



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

**PENEMPATAN OPTIMAL *FACTS DEVICES* PADA SISTEM
TRANSMISI JAWA-MADURA-BALI 500 KV TAHUN 2017
UNTUK MENINGKATKAN *POWER TRANSFER CAPABILITY***

Fitri Nur Eka Fauzi Mur Prasetyo
NRP 2215105057

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - TE141599

**PENEMPATAN OPTIMAL *FACTS DEVICES* PADA SISTEM
TRANSMISI JAWA-MADURA-BALI 500 KV TAHUN 2017
UNTUK MENINGKATKAN *POWER TRANSFER CAPABILITY***

Fitri Nur Eka Fauzi Mur Prasetyo
NRP 2215105057

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TE 141599

***OPTIMAL PLACEMENT OF FACTS DEVICES IN 500 KV
JAVA-MADURA-BALI TRANSMISSION SYSTEM 2017 TO
IMPROVE POWER TRANSFER CAPABILITY***

Fitri Nur Eka Fauzi Mur Prasetyo
NRP 2215105057

Supervisors

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.

Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institute Technology Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

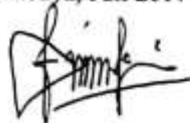
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**PENEMPATAN OPTIMAL FACTS DEVICES PADA SISTEM TRANSMISI JAWA-MADURA-BALI 500 KV TAHUN 2017 UNTUK MENINGKATKAN POWER TRANSFER CAPABILITY**" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017



Fitri Nur Eka Fauzi M. P.
NRP. 2215 105 057

**PENEMPATAN OPTIMAL *FACTS DEVICES* PADA SISTEM
TRANSMISI JAWA-MADURA-BALI 500 KV TAHUN 2017
UNTUK MENINGKATKAN *POWER TRANSFER CAPABILITY***

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc. Ph.D.

NIP. 1949 07 15 1974 12 1 001

Dosen Pembimbing II



26.7.2017

Vita L. B. Putri, ST. M.Sc. Ph.D.

NIP. 1982 08 29 2006 04 2 001



Penempatan Optimal FACTS *Devices* pada Sistem Transmisi Jawa-Madura-Bali 500 kV Tahun 2017 untuk Meningkatkan *Power Transfer Capability*

Fitri Nur Eka Fauzi M. P.
2215 105 057

Dosen Pembimbing I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Vita Lystianingrum B. P., S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstrak :

Berdasarkan RUPTL 2016-2025, diprediksikan terdapat penambahan beban sebesar 7001 MVA pada sistem transmisi 500 kV Jamali (Jawa-Madura-Bali) tahun 2017. Pertumbuhan beban yang terus menerus menyebabkan kapasitas transfer daya (*power transfer capability*) pada saluran mendekati pada batas limitnya. FACTS *devices* merupakan peralatan elektronika daya yang dapat mengatur aliran daya pada saluran transmisi. Pada Tugas Akhir ini diusulkan penggunaan TCSC untuk meningkatkan *power transfer capability* pada saluran. TCSC merupakan salah satu FACTS *devices* jenis *series compensator* yang dapat meningkatkan *power transfer capability* pada saluran transmisi dengan mengatur reaktansi pada saluran. Untuk mendapatkan penempatan TCSC yang dapat meningkatkan *power transfer capability* digunakan metode *Sensitivity Methods*. Untuk mengoptimasi besarnya kapasitas TCSC menggunakan metode GSA (*Gravitational Search Algorithm*). Untuk menguji performa dari metode GSA dibandingkan dengan metode PSO (*Particle Swarm Optimization*). Hasil yang diperoleh dari simulasi adalah penempatan TCSC optimal untuk meningkatkan *power transfer capability* yaitu pada saluran 8 atau saluran 6-14. Hasil penurunan aliran daya total sistem setelah dioptimasi dengan GSA sebesar 430.367 MW atau kenaikan *power transfer capability* sebesar 3.23%. Angka tersebut lebih besar dibandingkan dengan metode optimasi PSO yang menghasilkan penurunan aliran daya sebesar 427.907 MW atau kenaikan *power transfer capability* 3.21%.

Kata kunci : Saluran Transmisi 500 kV, *Power Transfer Capability*, *Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)*, *Sensitivity Methods*, *Gravitational Search Algorithm (GSA)*

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]

Optimal Placement of FACTS Devices in 500 kV Java-Madura-Bali Transmission System 2017 to Improve Power Transfer Capability

Fitri Nur Eka Fauzi M. P.
2215 105 057

Lecture Advisor I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Lecture Advisor II : Vita Lystianingrum B. P., S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstract :

Based on RUPTL 2016-2025, it is predicted that there will be 7001 MVA load increase in 500 kV Jamali (Java-Madura-Bali) transmission system in 2017. Continuous load growth causes the power transfer capability of the line to approach its limit. FACTS devices are power electronics devices that can regulate power flow on the transmission line. In this Final Project proposed the use of TCSC to improve the power transfer capability on the line. TCSC is one of the FACTS devices type series compensator that can increase the power transfer capability on the transmission line by regulating the reactance on the line. To get a placement TCSC that can increase the power transfer capability used Sensitivity Methods. To optimize the capacity of TCSC using GSA (Gravitational Search Algorithm) method. To test the performance of the GSA method compared with the PSO (Particle Swarm Optimization) method. The results obtained from the simulation is the optimal placement of TCSC to increase the power transfer capability that is on line 8 or line 6-14. Result of decrease of system total power flow after optimized with GSA equal to 430,367 MW or increase of power transfer capability equal to 3,23%. This figure is greater than the PSO optimization method resulting in a decrease in power flow equal to 427.907 MW or 3.21% increase in power transfer capability.

Keywords : *Transmission Line 500 kV, Power Transfer Capability, Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC), Sensitivity Methods, Gravitational Search Algorithm (GSA)*

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan berkat, kasih dan anugerah-Nya semata, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Penempatan Optimal *FACTS Devices* pada Sistem Transmisi Jawa-Madura-Bali 500 kV Tahun 2017 untuk Meningkatkan *Power Transfer Capability*”** dengan lancar, baik dan tepat waktu.

Adapun pembuatan Tugas Akhir ini ditujukan sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk menuntaskan studi sebagai mahasiswa S1 Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada kesempatan ini, penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua penulis yang senantiasa tak pernah lelah memberikan dukungan dari segi apapun kepada penulis dan tak henti-hentinya berdoa demi keberhasilan penulis. Ayah, Ibu terimakasih untuk semua yang kalian berikan.
2. Bapak Prof. Ontoseno Penangsang dan Ibu Vita Lystianingrum selaku Dosen Pembimbing, terima kasih atas segala bimbingan, perhatian, dan arahan selama pengerjaan Tugas Akhir.
3. Bapak Ardyono selaku Ketua Departemen Teknik Elektro yang telah memberikan kesempatan penulis untuk menuntut ilmu dan selalu terbuka saat penulis ingin berdiskusi.
4. Bapak dan Ibu dosen pengajar Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberikan materi, bersedia berbagi ilmu pengetahuan dan pengalaman berguna kepada penulis. Terimakasih Bapak, Ibu, jasa kalian akan selalu penulis kenang.
5. Dheny Ashari, yang telah banyak sekali membantu penulis dalam proses pengerjaan dari awal hingga saat ini. Terimakasih untuk dukungan dan motivasinya.
6. Shofia Kholisatus Sa'adah, yang selalu memberikan dukungan, perhatian, doa dan semangat kepada penulis dari awal penulis menuntut ilmu disini sampai detik ini.

7. Gilang Hari Pratomo dan Rizqi Aditya Pradana yang selalu membantu penulis saat penulis mengalami kesusahan, yang selalu terbuka saat penulis ingin berdiskusi. Terimakasih telah berbagi ilmu dan pandangan kepada penulis, selamat menggapai mimpi kita masing-masing.
8. Teman-teman LJ 2015 yang penulis kasihi. Terimakasih untuk semua dukungan, doa, kebersamaan dan kekeluargaan yang kalian berikan. Terkhusus untuk teman-teman satu topik Tugas Akhir dengan penulis : Tiar, Ady, Asyraf, Dito, Nizar, Fajar, Apri, Vita, untuk perjuangan dan kebersamaannya serta untuk Putu dan Imam, terimakasih atas dukungan yang kalian berikan.
9. Teman-teman *Power System Simulation Laboratory*, atas semua canda, tawa, dukungan dan semangat yang kalian berikan. Terkhusus kepada Bagus, Febri, Indra, Taufani, Aji, Fiona, Habibur.
10. *The Power Puff Girls* : Fidya, Adinda, Shofia, Mira, April, Vania, Thea, Vita, Norma yang telah menulis cerita manis untuk penulis. Bahagia bisa memiliki kalian disini.
11. Seluruh teman-teman Teknik Elektro ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberi semangat dan menulis cerita dengan penulis selama penulis disini. Terimakasih untuk semuanya.

Akhirnya, penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka oleh saran dan masukan yang bersifat membangun agar penulis dapat menghasilkan karya yang lebih baik di masa yang akan datang.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan.....	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Batas Masalah	3
1.5. Metodologi	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
1.7. Relevansi	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Studi Aliran Daya	7
2.1.1. Analisis Aliran Daya	7
2.1.2. Sistem Per Unit (pu).....	8
2.1.3. Persamaan Aliran Daya	9
2.1.4. Perhitungan Aliran Daya dan Rugi-Rugi Saluran ...	11
2.1.5. Aliran Daya dengan Metode <i>Newton Raphson</i>	12
2.2. FACTS <i>Devices</i>	17
2.2.1. <i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i> (TCSC)	18
2.2.2. Permodelan TCSC.....	19
2.2.3. Kurva Equivalent TCSC	20
2.3. <i>Power Transfer Capability</i>	21
2.4. <i>Sensitivity Methods</i>	25
2.4.1. Pengurangan pada Total Rugi-Rugi Daya Reaktif ..	25
2.4.2. Pengurangan pada Total Rugi-Rugi Daya Aktif	25

2.4.3. Pengurangan pada Aliran Daya Aktif	25
2.5. GSA (<i>Gravitational Search Algorithm</i>)	26
2.5.1. Algoritma Heuristik	26
2.5.2. Hukum dari Gravitasi	28
2.5.3. Algoritma GSA	30
BAB 3. PERMODELAN SISTEM DAN METODOLOGI	
PENYELESAIAN.....	35
3.1. Metodologi	35
3.2. Data Sistem Kelistrikan Jamali 500 kV	37
3.3. Penempatan TCSC dengan <i>Sensitivity Methods</i>	41
3.4. Optimasi <i>sizing</i> TCSC dengan GSA	42
3.5. Optimasi <i>sizing</i> TCSC dengan PSO.....	45
BAB 4. SIMULASI DAN ANALISIS.....	49
4.1. Aliran Daya sebelum Penempatan TCSC	49
4.2. Penempatan TCSC dengan Metode Sensitivity	52
4.3. Aliran Daya setelah Penempatan TCSC dengan Sizing -0.7 [1]	57
4.4. Aliran Daya setelah Penempatan TCSC dengan Metode Optimasi GSA	63
4.5. Aliran Daya setelah Penempatan TCSC dengan Metode Optimasi PSO	70
4.6. Aliran Daya dengan Kontingensi N-1 Sebelum dan Setelah Penempatan TCSC dengan Metode Optimasi GSA.....	75
BAB 5. PENUTUP	81
5.1. Kesimpulan	81
5.2. Saran.....	81
DAFTAR PUSTAKA.....	83
LAMPIRAN	89
RIWAYAT HIDUP.....	107

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tipikal Bus Sistem Tenaga Listrik [10]	9
Gambar 2.2	Permodelan Saluran Transmisi untuk Perhitungan Aliran Daya dan Rugi Daya [10].....	11
Gambar 2.3	Kesetimbangan Daya Bus i [13].....	16
Gambar 2.4	Rangkaian Sederhana TCSC Satu Fasa [22,24] ...	19
Gambar 2.5	Reaktansi Ekiivalen TCSC [23]	20
Gambar 2.6	Permodelan TCSC pada Saluran Transmisi [19]....	21
Gambar 2.7	Pmaks pada Saluran	22
Gambar 2.8	Permodelan Saluran Transmisi tanpa TCSC [1]	23
Gambar 2.9	Permodelan Saluran Transmisi dengan TCSC [1]..	24
Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> Metodologi Penyelesaian Tugas Akhir.	36
Gambar 3.2	<i>Single Line Diagram</i> Sistem Kelistrikan Jamali 500 kV Tahun 2017.....	38
Gambar 3.3	Diagram Alir Penempatan TCSC	41
Gambar 3.4	Diagram Alir Algoritma GSA	43
Gambar 3.5	Diagram Alir Algoritma PSO.....	47
Gambar 4.1	Grafik Tegangan Sebelum Penempatan TCSC	50
Gambar 4.2	Grafik Tegangan Setelah Penempatan TCSC dengan <i>Sizing</i> -0.7	61
Gambar 4.3	Grafik Tegangan Setelah Penempatan TCSC dengan <i>Sizing</i> Menggunakan Metode GSA	69
Gambar 4.4	Grafik Tegangan Setelah Penempatan TCSC dengan <i>Sizing</i> Menggunakan Metode PSO.....	75

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data Bus GI (Gardu Induk) Transmisi Jawa Bali 500 kV Tahun 2017.....	39
Tabel 4.1	Hasil Aliran Daya dan Pmaks Saluran Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV Tahun 2017 sebelum Penempatan TCSC	51
Tabel 4.2	Nilai Sensitivitas Saluran Berdasarkan Metode <i>Aij, Dij, Uij</i> Sistem Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017	53
Tabel 4.3	Urutan Sensitivitas Saluran berdasarkan <i>Sensitivity Methods</i> pada Sistem Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017	57
Tabel 4.4	Penurunan Aliran Daya Setelah Penempatan TCSC dengan <i>Sizing -0.7</i>	58
Tabel 4.5	Penurunan Aliran Daya pada Saluran setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan <i>Sizing-0.7</i>	58
Tabel 4.6	Kenaikan P_{maks} pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan <i>Sizing -0.7</i>	61
Tabel 4.7	Penurunan Aliran Daya Setelah Penempatan TCSC dengan Metode Optimasi GSA	64
Tabel 4.8	Penurunan Aliran Daya pada Saluran setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan <i>Sizing GSA</i>	65
Tabel 4.9	Kenaikan P_{maks} pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan <i>Sizing GSA</i>	67
Tabel 4.10	Penurunan Aliran Daya Setelah Penempatan TCSC dengan Metode Optimasi PSO	70
Tabel 4.11	Penurunan Aliran Daya pada Saluran setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan <i>Sizing PSO</i>	71
Tabel 4.12	Kenaikan P_{maks} pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan <i>Sizing GSA</i>	73
Tabel 4.13	Aliran Daya dengan Adanya Kontingensi n-1 Sebelum Penempatan TCSC	75
Tabel 4.14	Aliran Daya dengan Adanya Kontingensi n-1 Setelah Penempatan TCSC	78

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Listrik merupakan suatu kebutuhan pokok yang harus dipenuhi untuk menjamin keberlangsungan hidup masa kini. Pemenuhan kebutuhan listrik terus meningkat seiring bertambahnya pertumbuhan beban dari tahun ke tahun. Pertumbuhan beban yang terus menerus dan pengembangan kelistrikan yang semakin kompleks mengakibatkan sistem transmisi dipaksa untuk beroperasi mendekati batas kestabilannya[1]. Pada RUPTL 2016-2025, diprediksikan terdapat penambahan beban sebesar 7001 MVA pada sistem transmisi 500 kV Jamali (Jawa-Madura-Bali) pada tahun 2017[2]. Hal tersebut menjadi suatu tantangan bagi operasi sistem tenaga listrik karena peningkatan jumlah beban tidak sebanding dengan perluasan sistem pembangkit tenaga listrik. Pembangunan saluran transmisi untuk menunjang keberlangsungan pengiriman daya listrik dibatasi oleh kondisi wilayah, biaya yang sangat besar, serta waktu yang sangat lama. Sehingga pertumbuhan beban akan menimbulkan beberapa permasalahan seperti drop tegangan pada ujung saluran, rugi-rugi pada saluran meningkat, dimana hal tersebut menyebabkan kemampuan saluran transmisi dalam mentransfer daya (*power transfer capability*) mendekati pada batas limitnya.

FACTS (*Flexible AC Transmission System*) *devices* merupakan peralatan yang dapat mengatur aliran listrik dalam saluran transmisi dan juga meningkatkan *power transfer capability* pada saluran[3-4]. Pada awal pengembangannya teknologi FACTS *devices* ditujukan untuk menjawab permasalahan dalam peningkatan kapasitas pengaliran daya listrik pada sistem jaringan transmisi. FACTS merupakan peralatan elektronika daya yang berfungsi untuk mengendalikan jaringan transmisi secara fleksibel, dapat mengendalikan daya aktif dan reaktif secara terpisah pada jaringan transmisi, sehingga memungkinkan dapat memperbaiki aliran daya dan profil tegangan secara bersamaan. Dengan begitu dapat meningkatkan pasokan energi listrik ke konsumen. *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) merupakan salah satu peralatan FACTS yang dipasang seri (*series FACTS devices*) yang dapat meningkatkan kapasitas transfer daya pada saluran transmisi dengan mengatur reaktansi pada saluran[5-6]. Komponen utama TCSC adalah

induktor yang seri dengan thyristor dan paralel dengan kapasitor. TCSC mampu mengatur reaktansi pada saluran dengan melakukan pengaturan sudut pada thyristor[7]. Dalam melakukan penempatan dan penentuan besar kapasitas TCSC pada saluran transmisi diperlukan suatu metode agar didapatkan hasil yang optimal.

Pada Tugas Akhir ini, digunakan metode *Sensitivity Methods* untuk menentukan lokasi dari TCSC dan metode optimasi GSA untuk menentukan besar kapasitas optimal dari TCSC.

Menurut referensi [1] *sensitivity methods* merupakan metode yang dapat digunakan untuk menentukan penempatan optimal TCSC pada saluran transmisi. Sementara menurut penelitian yang sudah dilakukan, GSA memiliki hasil optimasi terbaik dibandingkan dengan GA (*Genetic Algorithm*), PSO (*Particle Swarm Optimization*) dan DE (*Differential Evolution*)[8]. Oleh karena itu, *sensitivity methods* dipilih sebagai metode dalam menentukan penempatan TCSC dan GSA dipilih sebagai metode untuk optimasi besarnya kapasitas dari TCSC. GSA merupakan salah satu kecerdasan buatan yang didasarkan pada hukum gravitasi Newton[9]. Pada hukum gravitasi Newton disebutkan bahwa setiap partikel di alam semesta menarik partikel lain dengan kekuatan yang berbanding lurus dengan massa partikel tersebut dan berbanding terbalik dengan jarak antara partikel.

1.2. Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah penentuan penempatan dan besar kapasitas optimal TCSC pada saluran transmisi 500 kV Jamali tahun 2017 sehingga dapat meningkatkan *power transfer capability* pada saluran. *Sensitivity Methods* digunakan untuk menentukan penempatan TCSC dan GSA digunakan untuk menentukan besar kapasitas TCSC. Untuk menguji performa dari GSA dalam menentukan kapasitas TCSC dibandingkan dengan PSO.

1.3. Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan lokasi penempatan TCSC pada saluran transmisi 500 kV Jamali tahun 2017 untuk meningkatkan *power transfer capability* dengan metode sensitivitas.

2. Menentukan besar kapasitas TCSC yang optimal pada saluran transmisi 500 kV Jamali tahun 2017 untuk meningkatkan *power transfer capability* dengan metode GSA.
3. Memperbaiki kualitas daya, dalam hal ini meningkatkan *power transfer capability* dengan indikator adanya penurunan aliran daya yang optimal pada saluran.
4. Mengetahui perbedaan besarnya aliran daya sebelum dan sesudah penempatan TCSC serta perbedaan hasil penurunan aliran daya pada saluran antara sebelum dan setelah dilakukan optimasi dengan GSA dan dibandingkan dengan PSO.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Simulasi dan analisis yang dilakukan pada kondisi *steady state*.
2. Analisis sistem tenaga yang dilakukan adalah studi aliran daya dengan menggunakan metode *Newton Raphson*.
3. Simulasi menggunakan software MATLAB R2015a.
4. Data yang digunakan untuk simulasi berdasarkan data dari P2B Jawa-Bali tahun 2017.
5. Dalam penentuan TCSC mengabaikan karakteristik dan rating TCSC di pasaran.
6. Faktor ekonomis tidak diperhitungkan

1.5. Metodologi

Penulisan dan penyusunan Tugas Akhir ini menggunakan metodologi sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk menunjang pengetahuan dan penguasaan materi dan metode yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir. Studi literatur meliputi pengumpulan jurnal ilmiah, pengumpulan *proceeding*, pengumpulan buku teks, pengumpulan artikel yang berhubungan dengan aliran daya, FACTS *device* khususnya TCSC, *Power Transfer Capability*, *Sensitivity Methods*, metode GSA dan metode PSO.

2. Pengumpulan Data

Data-data yang diperlukan adalah data sistem interkoneksi Jamali 500 kV yang berasal dari PT PLN (Persero) P2B Jawa-Bali

yaitu berupa data transmisi, data beban, dan data pembangkitan yang semuanya diambil dari *Log Sheet*.

3. Permodelan Sistem

Sistem tenaga listrik yang disimulasikan adalah sistem tenaga listrik Jamali 500 kV tahun 2017. Sistem ini terdiri dari 87 bus dimana 56 merupakan bus generator, 31 bus beban, dan 94 saluran. Untuk TCSC dimodelkan seperti *impedance* di mana output dari TCSC sendiri adalah pengurangan reaktansi pada saluran.

4. Simulasi

Simulasi dilakukan dengan menggunakan software MATLAB. Data-data yang diperlukan diolah dan diubah dalam bentuk matriks. Program yang digunakan dalam optimisasi ditulis dalam M-file.

5. Analisis dan perbandingan

Melakukan analisis dan perbandingan penurunan aliran daya pada saluran antara sebelum dan setelah penempatan TCSC dan antara sebelum dan sesudah menggunakan metode optimisasi.

6. Penulisan Buku

Buku Tugas Akhir dibuat untuk menunjukkan dan melaporkan hasil Tugas Akhir dari penelitian. Penulisan laporan dilakukan sebagai penggambaran kesimpulan dari Tugas Akhir. Kesimpulan tersebut merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab, dengan uraian sebagai berikut :

1. BAB 1

Bab 1 merupakan pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi yang digunakan, sistematika penulisan, dan relevansi dari laporan Tugas Akhir.

2. BAB 2

Bab 2 merupakan teori penunjang yang menjadi acuan Tugas Akhir meliputi teori sistem tenaga listrik secara umum, studi aliran daya dengan menggunakan Newton Raphson, prinsip kerja dari TCSC, teori mengenai *Power Transfer Capability*, teori mengenai *Sensitivity Methods*, teori algoritma dari metode optimisasi GSA dan juga teori algoritma dari metode optimisasi pembandingan GSA yaitu PSO.

3. **BAB 3**
Pada bab 3 menjelaskan tentang perancangan Tugas Akhir yang akan dilakukan, meliputi data yang akan digunakan, permodelan simulasi, dan persiapan program simulasi yang akan dijalankan.
4. **BAB 4**
Pada bab 4 menjelaskan tentang hasil simulasi penempatan optimal dan penentuan kapasitas optimal dari TCSC dan analisis data yang telah dilakukan setelah proses simulasi program.
5. **BAB 5**
Pada bab 5 menjelaskan tentang kesimpulan yang diambil dari hasil simulasi dan analisa yang telah dilakukan. Selain itu dicantumkan saran sehingga dapat memberikan perbaikan dan penyempurnaan untuk Tugas Akhir selanjutnya.

1.7. Relevansi

Hasil dari Tugas Akhir ini diharapkan mampu memberikan kontribusi terhadap perkembangan sistem kelistrikan, khususnya pada permasalahan yang berkaitan dengan penentuan penempatan dan *sizing* optimal TCSC untuk meningkatkan *Power Transfer Capability*. Selain itu hasil Tugas Akhir ini dapat digunakan sebagai dasar bagi penelitian yang lebih lanjut dan menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah serupa sebagai Tugas Akhir.

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Studi Aliran Daya

Pada sistem tenaga listrik, studi aliran daya merupakan bagian yang sangat penting. Melalui studi aliran daya, informasi yang penting pada suatu sistem tenaga listrik dapat diketahui. Informasi aliran daya yang dapat diketahui antara lain besar tegangan dan sudut pada tiap bus, impedansi saluran, serta daya aktif dan reaktif yang mengalir pada saluran transmisi[10]. Informasi-informasi tersebut sangat berguna untuk memperoleh kondisi awal (eksisting) dalam melakukan studi operasi ekonomis, hubung singkat, stabilitas, dan perencanaan pengembangan sistem serta menganalisa kondisi pembangkitan, saluran transmisi dan beban pada suatu sistem tenaga listrik.

2.1.1. Analisis Aliran Daya[10]

Dalam analisis aliran daya, sistem diasumsikan beroperasi dalam keadaan stabil, beban seimbang, dan menggunakan permodelan sistem satu phasa. Dalam suatu sistem tenaga setiap bus dihubungkan dengan empat besaran yaitu tegangan magnitude $|V|$, sudut phasa (δ), daya aktif (P), dan daya reaktif (Q). Pada penyelesaian aliran daya, dua dari empat besaran tersebut telah dispesifikasikan dan dua besaran lainnya merupakan hasil dari perhitungan. Berdasarkan besaran-besarannya bus pada sistem tenaga listrik diklasifikasikan menjadi tiga tipe yaitu[11] :

1. *Slack/swing* bus merupakan bus yang harga efektif dan sudut fasa tegangan sudah ditentukan (tetap). Dalam suatu sistem tenaga listrik ditetapkan 1 bus sebagai penyuplai kekurangan daya yang dibangkitkan oleh bus-bus pembangkitan yang lain. Dikarenakan rugi-rugi daya tidak dapat diprediksi dan beban yang terus mengalami naik dan turun sehingga, daya P dan Q yang dikirim bus ini, berubah-ubah sesuai dengan kekurangan daya yang dialami.
2. Generator bus (P-V bus), merupakan bus dengan injeksi daya aktif sudah ditentukan dengan harga magnitude tegangan tetap. Tidak seperti pada *slack* bus, bus ini menyuplai penuh berdasarkan ketentuan daya aktif.

3. Load bus (P-Q bus), merupakan bus yang terhubung dengan beban. P dan Q dari beban diketahui dan tetap, yang dihitung adalah V dan sudut fasa.

Dalam studi aliran daya suatu sistem tenaga listrik dibutuhkan data-data dari bus dan saluran transmisi.

Data-data yang terdapat pada tiap-tiap bus meliputi :

1. Magnitude tegangan (dalam bentuk pu)
2. Sudut tegangan θ
3. Besar pembebanan yang terdiri dari daya aktif (P) dan daya reaktif (Q)
4. Besar pembangkitan yang terdiri dari daya aktif (P), daya reaktif (Q), Q_{min} dan Q_{max} .

Data-data yang terdapat pada saluran transmisi meliputi :

1. Resistansi saluran transmisi (per unit)
2. Reaktansi saluran transmisi (per unit)
3. Tap trafo
4. Rating tegangan (dalam kV)

2.1.2. Sistem per-unit (pu)

Dalam memudahkan perhitungan dan analisis dalam sistem tenaga listrik, biasanya digunakan nilai-nilai dalam per unit (p.u). Dimana rumusan dasar dalam mencari satuan per unit adalah sebagai berikut[10-11] :

$$pu = \frac{actual}{base} \quad (2.1)$$

Untuk mencari nilai dari arus dasar (I_{base}), dinyatakan dalam persamaan berikut :

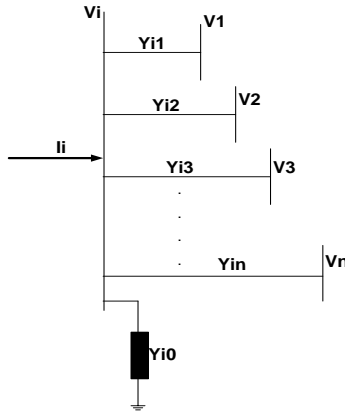
$$I_{base} = \frac{KVA_{base1\phi}}{KV_{baseLN}} \quad (2.2)$$

Untuk mencari nilai impedansi dasar (Z_{base}), dinyatakan pada persamaan berikut :

$$\begin{aligned} Z_{base} &= \frac{(KV_{baseLN})^2 \times 1000}{KVA_{base1\phi}} \\ &= \frac{(KV_{baseLN})^2}{MVA_{base1\phi}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.1.3. Persamaan Aliran Daya

Gambar 2.1 berikut merupakan gambaran sederhana dari tipikal bus pada sistem tenaga. Saluran transmisi direpresentasikan menggunakan model persamaan Π dimana impedansi sudah dikonversikan menjadi admitansi dalam p.u (per unit) dalam base yang sama.



Gambar 2.1 Tipikal Bus Sistem Tenaga Listrik [10]

Dari persamaan Y_{bus} dapat dicari nilai arus, dengan menggunakan hukum Kirchoff yang dijabarkan oleh persamaan berikut[10] :

$$I_i = V_i y_{i0} + (V_i - V_1) y_{i1} + (V_i - V_2) y_{i2} + \dots + (V_i - V_n) y_{in} \quad (2.4)$$

$$I_i = V_i (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}) - V_1 y_{i1} - V_2 y_{i2} - \dots - V_n y_{in} \quad (2.5)$$

Keterangan :

- I_i = arus pada bus i
- V_i = tegangan pada bus i
- y_{iN} = admitansi antara bus i dan bus N
- y_{i0} = admitansi antara bus i ke tanah

Dari persamaan (2.4) dan (2.5) diatas, dapat ditulis dengan persamaan :

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j, \quad j \neq 1 \quad (2.6)$$

Keterangan :

I_i = arus pada bus i

V_i, V_j = tegangan pada bus j

y_{ij} = admitansi antara bus i dan bus j

Daya aktif dan reaktif pada bus i adalah sebagai berikut :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.7)$$

Atau :

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.8)$$

Keterangan :

I_i = arus pada bus i

V_i = tegangan pada bus j

P_i = daya aktif pada bus i

Q_i = daya reaktif pada bus i

Sehingga didapatkan hubungan persamaan antara daya aktif dan reaktif dengan admitansi pada saluran transmisi sebagai berikut:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq 1 \quad (2.9)$$

Keterangan :

y_{ij} = admitansi antara bus i dan bus j

V_i = tegangan pada bus j

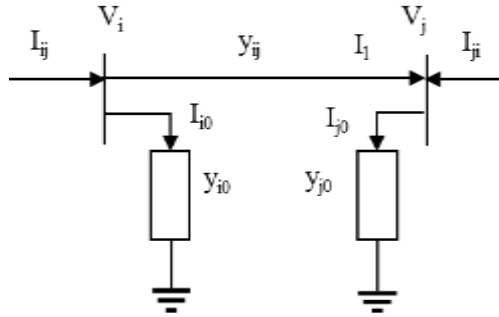
P_i = daya aktif pada bus i

Q_i = daya reaktif pada bus i

Dari persamaan (2.9) diketahui bahwa untuk mencari nilai aliran daya yang terjadi pada bus i , dibutuhkan adanya suatu iterasi dikarenakan persamaan diatas merupakan persamaan aljabar yang non-linear.

2.1.4. Perhitungan Aliran Daya dan Rugi-Rugi Saluran

Untuk melakukan perhitungan aliran daya, maka berdasarkan referensi [10], diasumsikan terjadi aliran daya antara 2 buah bus (i dan j) yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Pemodelan Saluran Transmisi untuk Perhitungan Aliran Daya dan Rugi Daya [10]

Aliran arus I_{ij} mengalir dari bus i menuju bus j , sehingga bila dilihat dari bus j , maka aliran arus dari bus i bernilai positif, sehingga besarnya arus yang mengalir dari $i \rightarrow j$ adalah sebagai berikut :

$$I_{ij} = I_l + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (2.10)$$

Aliran arus I_{ji} mengalir dari bus j menuju bus i , sehingga bila dilihat dari bus i , maka aliran arus dari bus j bernilai positif, sehingga besarnya arus yang mengalir dari $j \rightarrow i$ adalah sebagai berikut :

$$I_{ji} = -I_l + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \quad (2.11)$$

Kemudian untuk menghitung daya kompleks S_{ij} yang mengalir dari bus i ke j dan daya kompleks S_{ji} dari bus j ke bus i adalah sebagai berikut :

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.12)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (2.13)$$

Dari persamaan (2.12) dan (2.13) dapat diketahui besar rugi-rugi daya yang timbul pada saluran transmisi, yang merupakan penjumlahan aljabar dari kedua persamaan diatas, yaitu [10,11]:

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.14)$$

Keterangan :

S_{Lij} = total rugi-rugi daya pada saluran transmisi (MW)

S_{ij} = rugi-rugi saluran transmisi i - j

S_{ji} = rugi-rugi saluran transmisi j - i

2.1.5. Aliran Daya dengan Metode Newton Raphson

Aliran daya dapat diselesaikan dengan menggunakan bermacam-macam metode, diantaranya yaitu Metode Gauss Seidel, metode Newton Raphson, metode Fast Decouple dan lain-lain. Metode yang akan digunakan untuk melakukan proses perhitungan aliran daya pada Tugas Akhir ini adalah metode Newton Raphson.

Metode Newton-Raphson memiliki konvergensi kuadratik yang baik, perhitungan lebih cepat, dan lebih sedikit menggunakan iterasi. Untuk sistem tenaga yang besar, penggunaan metode Newton Raphson lebih praktis dan efisien, karena banyaknya iterasi yang diperlukan untuk memperoleh solusi tidak terikat pada ukuran sistem. Di dalam masalah aliran daya, daya aktif dan besar tegangan telah dispesifikasikan pada bus kontrol tegangan, maka persamaan aliran daya dapat dirumuskan ke dalam bentuk polar.

Dari Gambar 2.2, dapat dihitung arus yang memasuki bus i dituliskan oleh persamaan (2.6) dan ditulis ulang menjadi :

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.15)$$

Dari persamaan diatas, bila diubah dalam bentuk polar, maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.16)$$

Dengan memberikan daya kompleks pada bus i adalah :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.17)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.16) untuk nilai I_i ke dalam persamaan (2.17), maka didapatkan daya kompleks pada bus i adalah :

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.18)$$

Dengan memisahkan komponen riil dan imajineranya didapatkan daya aktif dan reaktif pada bus i , yaitu :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| |V_i| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.19)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| |V_i| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.20)$$

Persamaan (2.19) dan (2.20) merupakan persamaan nonlinier yang terdiri dari variabel bebas, dengan besaran tegangan dalam satuan per unit (p.u) dan sudut dalam radian. Untuk setiap bus, terdapat dua persamaan untuk bus beban yaitu persamaan (2.19) dan persamaan (2.20) dan satu persamaan untuk bus generator. Kedua persamaan diatas dikembangkan dari deret Taylor pada persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \dots \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & | & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \dots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \dots \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \dots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix}$$

Pada permasalahan ini, diasumsikan bahwa bus 1 merupakan *slack* bus. Matriks Jacobian memberikan hubungan yang linier antara perubahan kecil dalam sudut tegangan $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan besarnya tegangan $\Delta |V_i^{(k)}|$ dan dengan perubahan kecil pada daya aktif dan reaktif ($\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$). Elemen-elemen pada matriks Jacobian merupakan turunan parsial atau sebagian dari persamaan (2.19) dan (2.20) yang diturunkan terhadap $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan $\Delta |V_i^{(k)}|$. Dalam pemodelan pendek, dapat dituliskan sebagai :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \dots \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ \dots & \dots \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \dots \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Untuk bus Generator atau *voltage-controlled* bus, besar tegangan diketahui. Oleh karena itu, jika dalam suatu sistem yang terdiri dari n bus, m bus generator, maka terdapat m persamaan untuk ΔV dan ΔQ pada kolom matriks Jacobian dihilangkan. Juga terdapat konstrain yang berkaitan dengan daya *real* atau daya aktif adalah n-1, dan konstrain daya reaktif adalah n-1-m. Sedangkan ukuran matriks Jacobian adalah (2n-2-m) x (2n-2-m). Untuk elemen J1 memiliki ukuran matriks (n-1) x (n-1). Untuk elemen J2 memiliki ukuran (n-1) x (n-1-m). Untuk elemen J3 memiliki

ukuran (n-1-m) x (n-1) dan untuk elemen J4 memiliki ukuran (n-1-m) x (n-1-m).

Untuk persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen J1 adalah

:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq 1 \quad (2.23)$$

Untuk persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen J2 adalah

:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq 1}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq 1 \quad (2.25)$$

Untuk persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen J3 adalah

:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq 1 \quad (2.27)$$

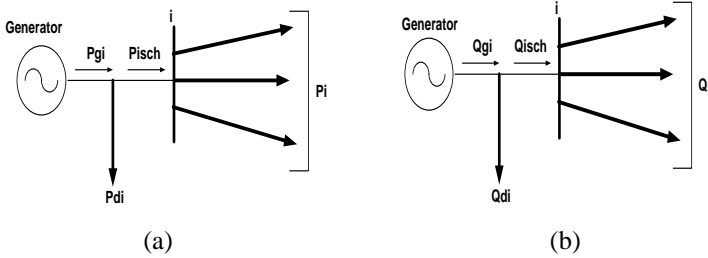
Untuk persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen J4 adalah

:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq 1}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq 1 \quad (2.29)$$

Berdasarkan referensi [12], maka dapat digambarkan aliran kesetimbangan daya pada bus i , untuk mendapatkan persamaan daya *scheduling*, daya sisa (*power residual/power mismatch*) dan perhitungan baru untuk sudut fasa dan tegangan bus yang baru.



Gambar 2.3 Kesetimbangan Daya Bus i , Daya Aktif (a) dan Daya Reaktif (b) [13]

Berdasarkan Gambar 2.3 diatas, maka persamaan daya *scheduling* didapatkan :

$$P_i^{sch} = P_{gi} - P_{di} \quad (2.30)$$

$$Q_i^{sch} = Q_{gi} - Q_{di} \quad (2.31)$$

Kemudian persamaan *power mismatch/power residual* adalah :

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2.32)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2.33)$$

Sehingga didapatkan tegangan dan sudut baru :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.34)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.35)$$

2.2. *FACTS Devices*

FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) merupakan peralatan yang memakai konsep elektronika daya. Elektronika daya merupakan teknologi yang terus berkembang hingga saat ini. *FACTS devices* yang diperkenalkan oleh Hingorani [14] pada tahun 1988, telah digunakan secara luas pada saluran-saluran transmisi. *FACTS* yang pada dasarnya terdiri dari kapasitor [15] dan reaktor, mampu mengatur reaktansi saluran transmisi sehingga kemampuan transfer daya meningkat. Pada tahun 1987, CR. Fuerte [16,17] dan Douglas J. Gotham pada tahun 1998 [18] telah membuktikan adanya akibat dari penambahan *FACTS* pada sistem tenaga listrik. *Loadability* sistem tenaga listrik yang diuji dengan *FACTS* dapat ditingkatkan seiring dengan peningkatan beban yang tidak dapat diprediksi [15,16,19,20,21].

FACTS devices memanfaatkan aplikasi thyristor untuk elektronika daya. Dengan memanfaatkan kontrol menggunakan elektronika daya, perangkat *FACTS* menjadi pilihan utama untuk melakukan kompensasi sekaligus kontrol. *FACTS devices* mampu memanfaatkan saluran transmisi pada batas pembebanan/*thermal* tanpa mengkhawatirkan kemungkinan terjadinya kelebihan beban/*overload*. Keadaan ini menjadi sangat penting untuk menambah kapasitas penyaluran daya tanpa penambahan jumlah saluran transmisi.

FACTS merupakan peralatan saluran transmisi yang berbasis elektronika daya sehingga memungkinkan untuk pengontrolan aliran daya dan tegangan baik secara *steady state* maupun dinamis. Pada umumnya *FACTS devices* bekerja sebagai :

1. Kompensator paralel
2. Kompensator seri
3. Kompensator seri dan paralel

Untuk memilih *FACTS devices* yang akan digunakan dapat disesuaikan dengan tujuan pemasangan *FACTS devices* atau melihat dari persamaan di bawah ini :

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{X_{ij}} \sin \theta_{ij} \quad (2.36)$$

$$Q_{ij} = \frac{1}{X_{ij}} (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (2.37)$$

Keterangan :

V_i dan V_j = tegangan pada bus i dan j

X_{ij} = reaktansi saluran
 θ_{ij} = sudut antara V_i dan V_j (dalam bentuk fasor)

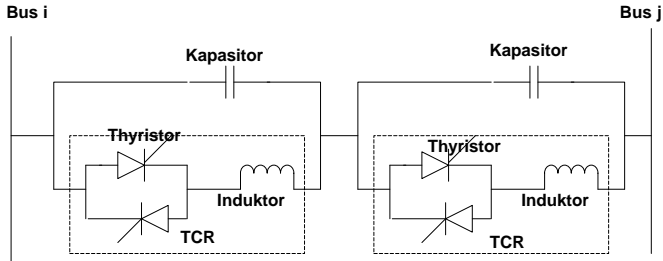
Bila dilihat dari kedua persamaan diatas, maka dapat disimpulkan bahwa daya aktif sangat dipengaruhi oleh θ_{ij} dan daya reaktif dipengaruhi oleh V_i dan V_j . Sedangkan perubahan reaktansi saluran mempengaruhi keduanya. Sehingga dari pernyataan tersebut, dibutuhkan *FACTS devices* untuk mengontrol aliran daya yaitu TCSC dimana TCSC dapat mengubah reaktansi saluran.

2.2.1. Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)

TCSC merupakan salah satu peralatan *FACTS* yang dipasang seri (*series FACTS devices*) yang dapat meningkatkan kapasitas transfer daya pada saluran transmisi dengan mengatur reaktansi pada saluran [5-6]. Pengaturan reaktansi pada saluran transmisi dapat dilakukan dengan mengontrol reaktansi TCSC, sehingga daya yang mengalir dapat ditingkatkan atau dapat dikatakan peningkatan kapabilitas saluran transmisi dalam mentransfer daya (*power transfer capability*).

Komponen utama TCSC adalah induktor yang seri dengan thyristor dan paralel dengan kapasitor. TCSC mampu mengatur reaktansi pada saluran dengan melakukan pengaturan pada sudut penyalan thyristor [7]. Dengan melakukan pengaturan pada sudut penyalan thyristor maka didapatkan beberapa variasi reaktansi induktif atau reaktansi kapasitif yang menyebabkan pertukaran daya reaktif yang cepat antara TCSC dan sistem [22]. Untuk mengompensasi sistem yang membutuhkan daya reaktif induktif, thyristor dipasang seri dengan induktor sedangkan untuk mengompensasi sistem yang membutuhkan daya reaktif kapasitif, thyristor dipasang paralel dengan kapasitor [23].

2.2.2. Permodelan TCSC



Gambar 2.4 Rangkaian Sederhana TCSC Satu Fasa [22,24]

Dari Gambar 2.4 diatas, terlihat bahwa TCSC merupakan kombinasi antara komponen TCR dengan kapasitor. TCR terdiri dari induktor yang dirangkai secara seri dengan thyristor. Sehingga fungsi X_{eq} merupakan hasil dari sudut penyalan :

$$B_L(\alpha) = -\frac{1}{\omega L} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right) \quad (2.38)$$

$$B_c = \omega C \quad (2.39)$$

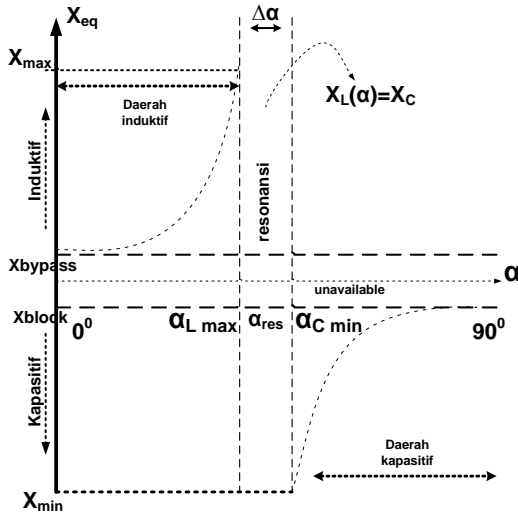
$$B_{eq} = B_L(\alpha) + B_c \quad (2.40)$$

Sehingga dari persamaan (2.38), (2.39) dan (2.40) didapatkan persamaan X_{eq} untuk TCSC :

$$X_{eq} = \frac{-1}{B_L(\alpha) + B_c} \quad (2.41)$$

Dari Gambar 2.4 dan persamaan (2.38) dalam pengoperasian thyristor dibutuhkan sudut penyalan. Sudut penyalan biasanya berkisar antara 0° hingga 360° . Akan tetapi menurut referensi [23], sudut penyalan thyristor berkisar antara 0° hingga 90° berdasarkan pada kurva ekuivalen dari TCSC itu sendiri. Penjelasan lebih lengkap akan dijelaskan pada bagian 2.1.3 mengenai kurva ekuivalen TCSC.

2.2.3. Kurva Equivalent TCSC

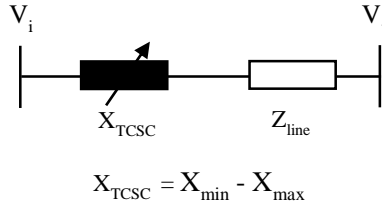


Gambar 2.5 Reaktansi Ekuivalen (X_{eq}) TCSC [23]

Berdasarkan kurva equivalent TCSC pada Gambar 2.5 diatas, besar sudut penyalan thyristor adalah 0^0 dan 90^0 . Sudut penyalan dijaga pada jarak $\Delta\alpha$ dari titik resonansi. Pada Gambar 2.5, batas kompensasi maksimum TCSC (X_{max}) ditentukan oleh sudut penyalan α_{Lmax} dan untuk batas kompensasi minimum (X_{min}) oleh sudut penyalan α_{Cmin} . Berdasarkan referensi[19], untuk mencegah terjadinya kompensasi yang berlebihan, derajat kompensasi TCSC yang diijinkan adalah 20% induktif hingga 70% kapasitif.

$$r_{TCSCmin} = -0,7;$$

$$r_{TCSCmax} = 0,2$$



Gambar 2.6 Permodelan TCSC pada Saluran Transmisi [19]

Berdasarkan Gambar 2.6 dapat diketahui hubungan antara rating TCSC dengan reaktansi pada saluran transmisi adalah sebagai berikut[19,25]:

$$X_{total} = X_{saluran} + X_{TCSC}$$

$$X_{TCSC} = r_{TCSC} \cdot X_{saluran} \quad (2.42)$$

Keterangan :

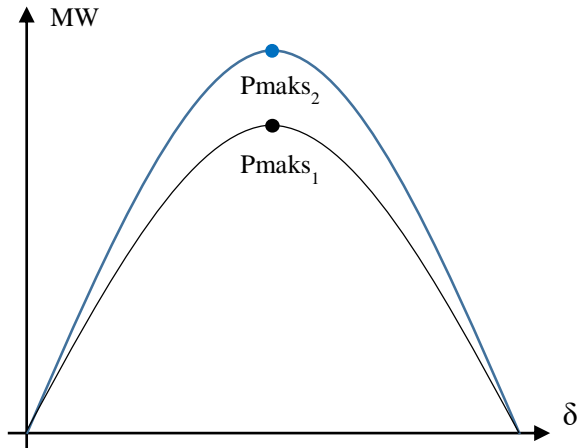
$X_{saluran}$ = reaktansi saluran transmisi

r_{TCSC} = rating kompensasi TCSC

2.3. *Power Transfer Capability*

Jika diterjemahkan secara langsung *Power Transfer Capability* mempunyai arti kemampuan saluran dalam mentransfer daya. Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah penempatan TCSC untuk meningkatkan *Power Transfer Capability* dimana tolok ukurnya adalah aliran daya dalam saluran. Jika aliran daya dalam saluran semakin kecil maka kapabilitas saluran dalam mentransfer daya akan semakin besar atau dalam artian *Power Transfer Capability*-nya akan semakin meningkat.

Power Transfer Capability dalam saluran meningkat juga dapat dilihat dari P_{maks} pada saluran tersebut. Apabila P_{maks} pada saluran semakin besar maka dapat menjadi indikator bahwa *Power Transfer Capability* pada saluran tersebut meningkat. Berikut merupakan rumusan P_{maks} pada saluran



Gambar 2.7 Pmaks pada Saluran

$$P_{maks} = \frac{V_i V_j}{X_{ij}} \quad (2.43)$$

Keterangan :

P_{maks} = daya maksimum yang dapat ditransfer pada saluran

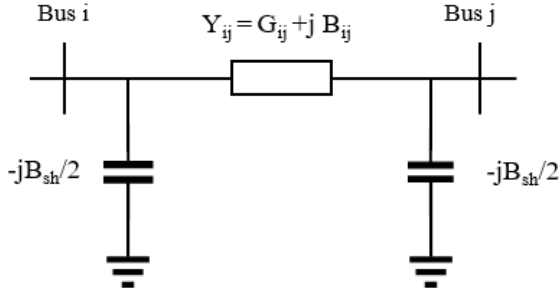
V_i = tegangan pada bus i

V_j = tegangan pada bus j

X_{ij} = reaktansi pada saluran yang menghubungkan bus i dan j

P_{maks1} merupakan daya maksimum yang dapat ditransfer pada saluran sebelum dipasang TCSC. P_{maks2} merupakan daya yang dapat ditransfer pada saluran setelah dipasang TCSC. Setelah dipasang TCSC, reaktansi pada saluran berkurang, sehingga dapat meningkatkan P_{maks} pada saluran.

Gambar 2.8 berikut merupakan permodelan saluran transmisi tanpa penambahan TCSC. Saluran transmisi direpresentasikan dengan persamaan equivalen parameter π yang terhubung diantara dua bus [1].



Gambar 2.8 Permodelan Saluran Transmisi tanpa TCSC [1]

Jika tegangan pada bus i dan bus j direpresentasikan dengan $V_i \angle \delta_i$ dan $V_j \angle \delta_j$, maka persamaan daya kompleks yang mengalir dari bus i ke j dan dari bus j ke i adalah sebagai berikut [1]:

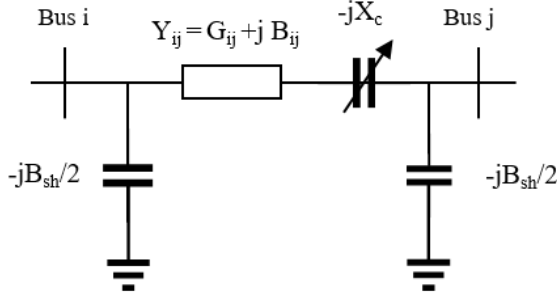
$$P_{ij} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j [G_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B_{ij} \sin(\delta_{ij})] \quad (2.44)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (B_{ij} + B_{sh}) - V_i V_j [G_{ij} \sin(\delta_{ij}) - B_{ij} \cos(\delta_{ij})] \quad (2.45)$$

$$P_{ji} = V_j^2 G_{ij} - V_i V_j [G_{ij} \cos(\delta_{ij}) - B_{ij} \sin(\delta_{ij})] \quad (2.46)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2 (B_{ij} + B_{sh}) + V_i V_j [G_{ij} \sin(\delta_{ij}) + B_{ij} \cos(\delta_{ij})] \quad (2.47)$$

Sedangkan Gambar 2.9 berikut merupakan permodelan saluran transmisi setelah penempatan TCSC. Pada analisa aliran daya (*load flow*) menggunakan metode Newton Raphson, X_c digunakan sebagai variabel kontrol.



Gambar 2.9 Permodelan Saluran Transmisi dengan TCSC [1]

Aliran daya aktif dan reaktif dari bus i menuju bus j dan dari bus j menuju bus I pada saluran setelah penempatan TCSC adalah sebagai berikut [1] :

$$P_{ij}^c = Vi^2 G'_{ij} - ViVj [G'_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B'_{ij} \sin(\delta_{ij})] \quad (2.48)$$

$$Q_{ij}^c = -Vi^2 (B'_{ij} + B_{sh}) - ViVj [G'_{ij} \sin(\delta_{ij}) - B'_{ij} \cos(\delta_{ij})] \quad (2.49)$$

$$P_{ji}^c = Vj^2 G'_{ij} - ViVj [G'_{ij} \cos(\delta_{ij}) - B'_{ij} \sin(\delta_{ij})] \quad (2.50)$$

$$Q_{ji}^c = -Vj^2 (B'_{ij} + B_{sh}) + ViVj [G'_{ij} \sin(\delta_{ij}) + B'_{ij} \cos(\delta_{ij})] \quad (2.51)$$

Rugi-rugi daya aktif dan reaktif pada saluran transmisi yang terpasang TCSC dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut [1]:

$$P_L = P_{ij} + P_{ji} = G'_{ij}(Vi^2 + Vj^2) - 2ViVj G'_{ij} \cos(\delta_{ij}) \quad (2.52)$$

$$Q_L = Q_{ij} + Q_{ji} = -(Vi^2 + Vj^2)(B'_{ij} + B_{sh}) + 2ViVj \cos(\delta_{ij}) \quad (2.53)$$

dimana :

$$G'_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + (x_{ij} - x_c)^2} \quad (2.54)$$

$$B'_{ij} = -\left(\frac{x_{ij} - x_c}{r_{ij}^2 + (x_{ij} - x_c)^2} \right) \quad (2.55)$$

2.4. Sensitivity Methods

Menurut referensi [1] sensitivitas saluran transmisi dapat dihitung dengan menggunakan tiga metode yaitu:

2.4.1. Pengurangan pada Total Rugi-Rugi Daya Reaktif

Metode ini berdasarkan pada sensitivitas dari total rugi-rugi daya reaktif ($\sum Q_L$) dimana dapat dikontrol dengan nilai reaktansi X_{ij} . Hubungan antara *Loss Sensitivity* (a_{ij}) dengan X_{ij} dapat dilihat dari persamaan berikut :

$$a_{ij} = \frac{\partial Q_L}{\partial X_{ij}} \quad (2.56)$$

$$a_{ij} = [Vi^2 + Vj^2 - 2ViVj \cos \delta_{ij}] \frac{r_{ij}^2 - x_{ij}^2}{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)^2} \quad (2.57)$$

Semakin positif nilai a_{ij} maka semakin sensitif saluran tersebut. TCSC ditempatkan pada saluran yang memiliki *sensitivity index* paling positif.

2.4.2. Pengurangan pada Total Rugi-Rugi Daya Aktif

Metode ini berdasarkan pada sensitivitas dari total rugi-rugi daya aktif ($\sum P_L$) dimana dapat dikontrol dengan nilai reaktansi X_{ij} . Hubungan antara *Loss Sensitivity* (d_{ij}) dengan X_{ij} dapat dilihat dari persamaan berikut:

$$d_{ij} = \frac{\partial P_L}{\partial X_{ij}} \quad (2.58)$$

$$d_{ij} = [Vi^2 + Vj^2 - 2ViVj \cos \delta_{ij}] \frac{(-2r_{ij} * x_{ij})}{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)^2} \quad (2.59)$$

Semakin positif nilai d_{ij} maka semakin sensitif saluran tersebut. TCSC ditempatkan pada saluran yang memiliki *sensitivity index* paling positif.

2.4.3. Pengurangan pada Aliran Daya Aktif

Metode ini berdasarkan pada sensitivitas dari aliran daya aktif, dimana dapat dikontrol dengan nilai reaktansi X_{ij} . Hubungan antara *Loss Sensitivity* (u_{ij}) dengan X_{ij} dapat dilihat dari persamaan berikut:

$$u_{ij} = \frac{\partial P_{i-j}}{\partial X_{ij}} \quad (2.60)$$

$$u_{ij} = [-Vi^2 + ViVj \cos \delta_{ij}] \frac{(2r_{ij} * x_{ij})}{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)^2} + [ViVj \sin \delta_{ij}] \frac{r_{ij}^2 - x_{ij}^2}{(r_{ij}^2 + x_{ij}^2)^2} \quad (2.61)$$

Semakin negatif nilai u_{ij} maka semakin sensitif saluran tersebut. TCSC ditempatkan pada saluran yang memiliki *sensitivity index* paling negatif.

2.5. GSA (*Gravitational Search Algorithm*)[9]

Selama beberapa dekade terakhir banyak perkembangan yang terjadi pada algorithma yang terinspirasi oleh perilaku fenomena alam. Hal tersebut ditunjukkan dari beberapa penelitian yang menunjukkan bahwa algorithma merupakan salah satu metode yang sesuai untuk menyelesaikan masalah komputasi yang kompleks seperti optimasi fungsi objektif, pengenalan pola, tujuan pengendalian, citra pengolahan, pemodelan filter, dan lain sebagainya. Berbagai pendekatan heuristic telah dilakukan dalam berbagai penelitian sejauh ini, sebagai contoh *Genetic Algorithm* [27], *Simulated Annealing* [28], *Ant Colony Search Algorithm* [29], *Particle Swarm Optimization* [30], dan lain sebagainya.

GSA (*Gravitational Search Algorithm*) merupakan salah satu algoritma yang didasarkan pada hukum gravitasi Newton “Setiap partikel di alam semesta menarik partikel lainnya dengan gaya yang berbanding lurus dengan hasil perkalian massa dari kedua partikel tersebut dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak diantara partikel tersebut [9].

2.5.1. Algoritma Heuristik

Kata “heuristik” berasal dari Bahasa Yunani yang berarti ‘tahu’ atau ‘menemukan’. Secara spesifik heuristik merupakan teknik untuk mencari solusi yang baik (mendekati optimal) dengan biaya komputasi yang masuk akal tanpa dapat menjamin kelayakan (optimalitas) atau bahkan dalam banyak kasus untuk menyatakan seberapa mendekati optimalitas solusi yang layak [29].

Algoritma heuristik meniru proses fisik atau biologi. Beberapa algoritma yang paling terkenal dari algoritma ini adalah *Genetic Algorithm* [27], *Simulated Annealing* [28], *Artificial Immune System*, *Ant*

Colony Optimization [29], *Particle Swarm Optimization* [30], and *Bacterial Foraging Algorithm* [31]. *Genetic Algorithm* (GA) merupakan algoritma yang terinspirasi dari teori evolusi Darwin, *Simulated Annealing* (SA) merupakan algoritma yang dirancang dengan menggunakan efek termodinamika, *Artificial Immune Systems* (AIS) merupakan algoritma yang meniru simulasi sistem kekebalan biologis, *Ant Colony Optimization* (ACO) merupakan algoritma yang meniru perilaku semut yang mencari makan untuk makanan, *Bacterial Foraging Algorithm* merupakan algoritma yang meniru pencarian bakteri [11,19] dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) merupakan algoritma yang meniru perilaku kawanan burung.

Semua algoritma heuristik yang disebutkan di atas memiliki perilaku stokastik (probabilitas). Namun, Formato telah mengusulkan algoritma pencarian heuristik deterministik berdasarkan metafora kinematika gravitasi yang disebut *Central Force Optimization* (CFO). Dalam beberapa algoritma stokastik, seperti SA pencarian dimulai dari satu titik dan berlanjut secara berurutan. Namun, sebagian besar algoritma heuristik melakukan pencarian secara paralel dengan beberapa titik awal sebagai contoh algoritma yang berbasis *swarm* yang meniru perilaku kumpulan burung ataupun ikan.

Dalam algoritma berbasis *swarm*, setiap anggota menjalankan serangkaian operasi tertentu dan membagikan informasinya kepada yang lain. Operasi ini sangat sederhana, namun efek kolektif mereka yang dikenal sebagai kecerdasan *swarm*, menghasilkan hasil yang mengejutkan. Interaksi lokal antar *agent* memberikan hasil global yang memungkinkan sistem menyelesaikan masalah tanpa menggunakan *central controller*. Dalam kasus ini, operasi anggota termasuk pencarian acak, umpan balik positif, umpan balik negatif dan interaksi antar *agent*, dilakukan pada situasi organisasi mandiri [29].

Dua aspek umum dalam algoritma heuristik berbasis populasi yaitu eksplorasi dan eksploitasi. Eksplorasi adalah kemampuan dalam memperluas ruang pencarian. Sedangkan eksploitasi adalah kemampuan untuk menemukan optima disekitar solusi baik yang ditemukan. Pada awal-awal iterasi, algoritma pencarian heuristik mengeksplorasi ruang pencarian untuk menemukan solusi baru. Agar tidak terperangkap dalam optimalisasi lokal, algoritma harus melakukan eksplorasi pada beberapa iterasi pertama. Oleh karena itu, eksplorasi merupakan hal penting dalam algoritma heuristik berbasis populasi. Dengan iterasi yang semakin bertambah, eksplorasi memudar dan eksploitasi memudar, sehingga

algoritma mempercepat dirinya sendiri dalam titik yang semioptimal. Untuk memperoleh performa yang tinggi, kunci pentingnya adalah pertukaran yang sesuai antara eksplorasi dan eksploitasi.

Algoritma pencarian berbasis populasi melewati tiga step pada setiap iterasinya untuk mewujudkan konsep dari eksplorasi dan eksploitasi. Pertama adaptasi diri, kedua kerja sama dan ketiga persaingan. Pada tahap adaptasi diri, setiap agen meningkatkan kinerjanya, selanjutnya pada tahap kerjasama, antar agen berkolaborasi satu sama lain dengan mentransfer informasi, dan pada tahap kompetisi, antar agen berkompetisi untuk bertahan. Langkah-langkah ini biasanya dalam bentuk stokastik. Konsep ini memandu sebuah algoritma untuk menemukan optimal global. Semua algoritma pencarian berbasis populasi memberikan hasil yang memuaskan namun tidak ada algoritma heuristik yang dapat memberikan kinerja superior daripada yang lain dalam menyelesaikan masalah optimasi. Dengan kata lain, algoritma dapat memecahkan beberapa masalah dengan lebih baik dan beberapa masalah lebih buruk daripada yang lain [32]. GSA merupakan algoritma pencarian berbasis populasi dengan mempertimbangkan aspek-aspek yang disebutkan diatas dan meniru konsep dari peraturan gaya gravitasi.

2.5.2. Hukum dari Gravitasi [9]

Gaya gravitasi menyebabkan kecenderungan massa untuk saling berakselerasi. Hal tersebut merupakan salah satu dari empat interaksi mendasar di alam (yang lainnya adalah gaya elektromagnetik, gaya nuklir lemah, dan gaya nuklir kuat). Setiap partikel di alam semesta menarik partikel lainnya. Cara gaya gravitasi Newton berperilaku disebut “tindakan dalam jarak”. Ini berarti gravitasi berperan diantara partikel terpisah tanpa perantara dan tanpa penundaan. Dalam hukum gravitasi Newton, setiap partikel menarik partikel lainnya dengan gaya gravitasi. Gaya gravitasi antara dua partikel berbanding lurus dengan perkalian masa antara dua partikel tersebut dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak diantara partikel tersebut.

$$F = G \frac{M_1 \cdot M_2}{R^2} \quad (2.62)$$

Keterangan :

F = besarnya gaya gravitasi

G = konstanta gravitasi

$M_1 M_2$ = massa masing-masing partikel
 R = jarak antara dua partikel

Hukum kedua Newton mengatakan bahwa ketika sebuah gaya, F , diterapkan pada suatu partikel, maka percepatan, a , partikel tersebut hanya bergantung dari gaya dan massanya.

$$a = \frac{F}{M} \quad (2.63)$$

Berdasarkan persamaan (2.62) dan (2.63) gaya gravitasi menarik di antara semua partikel di alam semesta, dimana partikel yang lebih besar dan lebih dekat mempunyai gaya gravitasi yang lebih tinggi. Peningkatan jarak diantara dua partikel berarti menurunkan gaya gravitasi diantara dua partikel tersebut.

Selain itu, karena efek penurunan gravitasi, nilai sebenarnya dari konstanta gravitasi, bergantung pada umur sebenarnya alam semesta. Persamaan (2.84) dibawah ini memberikan penurunan konstanta gravitasi G terhadap waktu.

$$G(t) = G(t_0) x \left(\frac{t_0}{t} \right)^\beta, \quad \beta < 1 \quad (2.64)$$

Keterangan :

$G(t)$ = nilai konstanta gravitasi pada waktu t

$G(t_0)$ = nilai konstanta gravitasi pada interval kuantum kosmik pertama dari waktu t_0 [26]

Tiga jenis massa didefinisikan dalam fisika teoritis

1. Massa gravitasi aktif (M_a) merupakan ukuran kekuatan medan gravitasi karena benda tertentu. Medan gravitasi suatu benda dengan massa gravitasi aktif kecil lebih lemah daripada benda dengan massa gravitasi aktif yang lebih besar.
2. Massa gravitasi pasif (M_p) merupakan ukuran kekuatan interaksi suatu benda dengan medan gravitasi. Dalam medan gravitasi yang sama, benda dengan massa gravitasi pasif yang lebih kecil memiliki gaya gravitasi yang lebih kecil daripada benda dengan massa gravitasi pasif yang lebih besar.
3. Massa Inersia (M_i) merupakan perlawanan suatu benda untuk mengubah keadaan gerak saat gaya diterapkan. Benda dengan

massa inersia yang besar mengubah gerakannya lebih lambat dan benda dengan massa inersia kecil mengubah gerakannya dengan lebih cepat.

Berdasarkan aspek-aspek yang disebutkan diatas, sehingga persamaan newton dapat ditulis ulang sebagai berikut :

Gaya gravitasi F_{ij} yang bekerja pada massa i oleh massa j sebanding dengan perkalian gravitasi aktif massa j dan gravitasi pasif massa i dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak diantara keduanya. Percepatan massa i sebanding dengan gaya F_{ij} dan berbanding terbalik dengan massa inersia i . Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$F_{ij} = G \frac{M_{aj} \times M_{pi}}{R^2} \quad (2.65)$$

$$a_i = \frac{F_{ij}}{M_{ii}} \quad (2.66)$$

Keterangan :

M_{aj} = massa gravitasi aktif dari partikel i

M_{pi} = massa gravitasi pasif dari partikel j . Dan

M_{ii} = massa inersia partikel i .

Meskipun massa inersia, massa gravitasi aktif dan massa gravitasi pasif secara konseptual berbeda, tidak ada percobaan yang pernah menunjukkan perbedaan diantaranya. Teori relativitas umum bersandar pada asumsi bahwa massa gravitasi inersia dan massa gravitasi pasif setara, ini dikenal sebagai prinsip kesetaraan lemah. Teori relativitas umum juga mengasumsikan kesetaraan massa inersia dan massa gravitasi aktif, kesetaraan ini disebut prinsip ekuivalen kuat.

2.5.3. Algoritma GSA

Dalam algoritma ini agen dianggap sebagai objek dan *performance*-nya diukur dari massa mereka. Semua benda saling tarik menarik oleh gaya gravitasi dan gaya ini menyebabkan pergerakan global semua objek ke benda-benda dengan massa yang lebih berat. Oleh karena itu massa bekerja sama menggunakan bentuk komunikasi langsung, melalui gaya gravitasi. Massa yang berat – yang sesuai dengan solusi yang baik – bergerak lebih lambat daripada massa yang ringan, hal tersebut menjamin langkah eksploitasi pada algoritma.

Pada GSA setiap agen (massa) memiliki empat spesifikasi : posisi, massa inersia, massa gravitasi aktif dan massa gravitasi pasif. Posisi dari massa menunjukkan solusi dari permasalahan dan massa gravitasi serta massa inersia ditentukan dengan menggunakan fungsi fitness.

Dengan kata lain setiap agen (massa) menyajikan sebuah solusi dan algoritma dinavigasi dengan menyesuaikan besar massa gravitasi dan massa inersia dengan benar. Dengan iterasi waktu demi waktu, massa tertarik pada massa terberat. Massa ini akan menyajikan solusi optimal diruang pencarian.

Hukum gravitasi menyebutkan bahwa setiap partikel menarik setiap partikel lainnya dan gaya gravitasi antara dua partikel tersebut berbanding lurus dengan perkalian massa diantara keduanya dan berbanding terbalik dengan jarak diantara keduanya. Jarak yang digunakan R bukan R^2 disemua kasus eksperimental. Karena menurut hasil dari berbagai penelitian R memberikan solusi yang lebih baik daripada R^2

Hukum Gerak menyebutkan bahwa laju kecepatan dari setiap massa merupakan jumlah fraksi kecepatan sebelumnya dan percepatan massa tersebut. Percepatan dari massa sama dengan gaya yang dimainkan pada sistem dibagi dengan massa inersianya.

Sebuah sistem dengan N agent (massa), posisi awal masing-masing agent :

$$X_i = (X_i^1, \dots, X_i^d, \dots, X_i^n) \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N \quad (2.67)$$

Keterangan :

X_i^d = posisi dari masing-masing agen i pada dimensi d

Pada waktu yang spesifik ' t ', dapat didefinisikan gaya yang bekerja pada massa ' i ' dari massa ' j ' adalah sebagai berikut

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) x M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (2.68)$$

Keterangan :

M_{aj} = massa gravitasi aktif yang berhubungan dengan agen j

M_{pi} = massa gravitasi pasif yang berhubungan dengan agen i

$G(t)$ = konstanta gravitasi pada waktu t

ε = konstanta kecil

$R_{ij}(t)$ = jarak Euclidian antara dua agen i dan j

$$R_{ij}(t) = \|X_i(t), X_j(t)\|_2 \quad (2.69)$$

Total gaya yang bekerja pada agen i dalam dimensi d adalah jumlah komponen d secara acak dari gaya yang diberikan dari agen lain adalah sebagai berikut :

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N rand_j F_{ij}^d(t) \quad (2.70)$$

Keterangan :

$rand_j$ = nilai random pada interval 0-1

Oleh karena itu berdasarkan hukum gerak, percepatan dari agen i pada waktu t dan pada arah d didasarkan pada persamaan :

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (2.71)$$

Keterangan :

M_{ii} = massa inersia pada agen i

Selanjutnya setiap agen akan mengupdate kecepatannya dengan rumusan kecepatan baru merupakan penjumlahan dari fraksi kecepatan lama dengan percepatan barunya. Oleh karena itu persamaan kecepatan dan posisi yang baru adalah sebagai berikut :

$$v_i^d(t+1) = rand_i x v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (2.72)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (2.73)$$

Konstanta gravitasi G diinisiasi pada awalnya dan akan berkurang seiring waktu untuk mengendalikan keakuratan pencarian. Dengan kata lain G adalah fungsi dari nilai awal G_0 dan waktu (t)

$$G(t) = G(G_0, t) \quad (2.74)$$

Massa gravitasi dan inersia dihitung dengan evaluasi nilai fitness. Agen yang memiliki massa lebih berat berarti merupakan agen yang lebih efisien. Ini berarti agen yang lebih baik memiliki daya tarik yang lebih tinggi dan berjalan lebih lambat. Dengan mengasumsikan persamaan massa gravitasi dan inersia, nilai dari massa dihitung menggunakan mapping dari nilai fitness. Update dari massa gravitasi dan inersia digambarkan dengan persamaan sebagai berikut

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.75)$$

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (2.76)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad (2.77)$$

Keterangan :

$fit_i(t)$ = nilai fitness dari agent i diwaktu t
 $best(t) - worst(t)$ = mengikuti fungsi dari algoritma untuk minimisasi atau maksimalisasi
 $M_i(t)$ = massa dari agen i pada waktu t

Untuk menyelesaikan masalah minimisasi menggunakan persamaan berikut :

$$best(t) = \min_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (2.78)$$

$$worst(t) = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t)$$

Sedangkan untuk menyelesaikan masalah maksimalisasi menggunakan persamaan berikut :

$$best(t) = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (2.79)$$

$$worst(t) = \min_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t)$$

Salah satu cara untuk mengkompromikan eksplorasi dan eksploitasi yang baik adalah dengan mengurangi jumlah agen seiring meningkatnya jumlah iterasi seperti pada persamaan (2.70). Oleh karena itu diusulkan hanya satu set agen dengan massa yang lebih besar yang digunakan untuk mempengaruhi agen yang lain. Hal ini dapat mengurangi kemampuan dari eksplorasi dan meningkatkan kemampuan eksploitasi. Agar tidak terjebak dalam lokal optima, algoritma harus memiliki kemampuan eksplorasi yang besar di awal. Dengan semakin bertambahnya jumlah iterasi, kemampuan eksplorasi semakin berkurang sebaliknya kemampuan eksploitasi semakin meningkat. Untuk meningkatkan performa GSA dengan eksplorasi dan eksploitasi dapat dilakukan dengan agen K_{best} yang akan mempengaruhi agen lain. K_{best} merupakan fungsi waktu dengan nilai awal K_0 diawal dan nilainya menurun seiring berjalannya waktu, K_{best} mengalami penurunan secara linier dan pada akhirnya tersisa satu agen yang menerapkan kekuatannya pada yang lain. Oleh karena itu persamaan (2.80) dapat dimodifikasi menjadi persamaan sebagai berikut :

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in K_{best}, j \neq i} rand_j F_{ij}^d(t) \quad (2.80)$$

Keterangan :

K_{best} = Nilai K dimana memiliki nilai kesesuaian terbaik dan massa terbesar

Berikut merupakan langkah-langkah dalam algoritma GSA:

1. Identifikasi ruang pencarian
2. Inisialisasi acak
3. Evaluasi nilai fitness
4. Update $G(t)$, $best(t)$, $worst(t)$ dan $Mi(t)$ untuk $i = 1, 2, \dots, N$
5. Perhitungan total gaya dalam arah yang berbeda
6. Perhitungan percepatan dan kecepatan
7. Update posisi agen
8. Ulangi langkah 3-7 hingga kriteria berhenti tercapai

BAB III

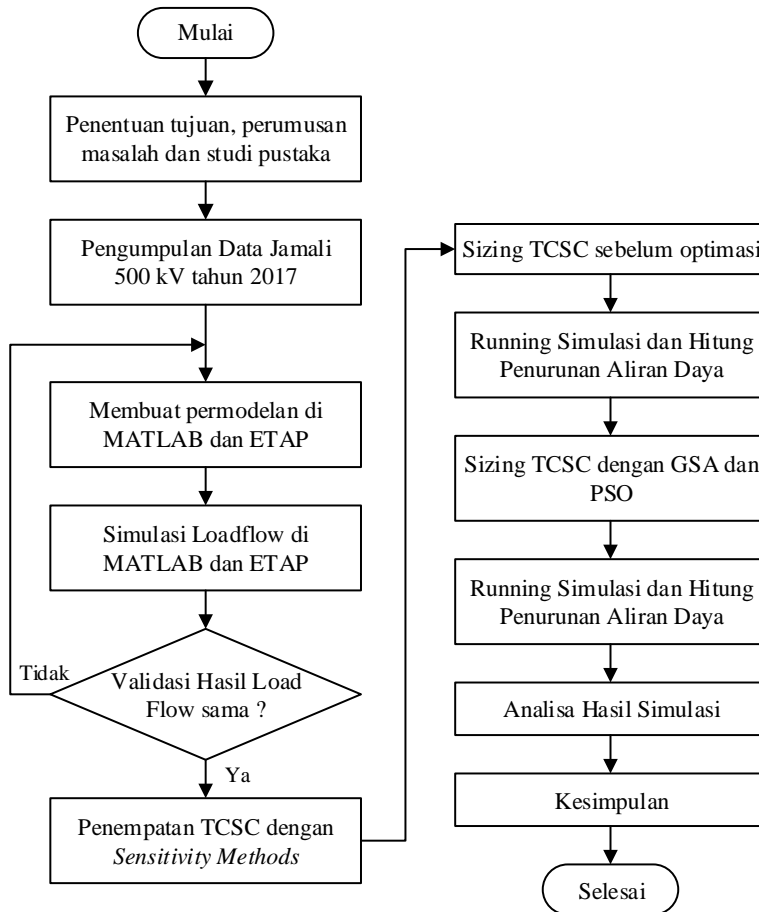
PERMODELAN SISTEM DAN METODOLOGI PENYELESAIAN

Dalam Tugas Akhir ini, *FACTS (Flexible AC Transmission System) devices* yaitu TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) ditempatkan pada sistem kelistrikan Jamali (Jawa-Madura-Bali) 500 kV. *Sensitivity Methods* digunakan untuk melakukan penempatan TCSC dan metode kecerdasan GSA (*Gravitational Search Algorithm*) digunakan untuk menentukan *sizing* optimal pada TCSC. Dimana sebagai pembanding dari metode optimasi GSA ini adalah metode optimasi PSO (*Particle Swarm Optimization*). Penempatan dan *sizing* TCSC dilakukan untuk meningkatkan *Power Transfer Capability* (PTC) pada saluran. *Power Transfer Capability* dilihat dari peningkatan kapabilitas saluran transmisi dalam menyalurkan daya total sistem. Semakin besar penurunan aliran daya total pada saluran setelah dilakukan penempatan TCSC maka, peningkatan *power transfer capability*-nya semakin besar. Metode penyelesaian Tugas Akhir, data pembangkitan, data pembebanan, data saluran transmisi, dan pemodelan sistem Jamali 500 kV akan diuraikan pada bab ini. Proses simulasi program menggunakan Matlab dan validasi menggunakan *software* ETAP.

3.1 Metodologi

Metodologi merupakan suatu cara yang tersusun secara teratur dan terstruktur dalam melakukan penelitian. Metodologi digunakan untuk mengetahui tahapan awal hingga akhir pada pengerjaan penelitian.

Gambar 3.1 di bawah merupakan *flowchart* metodologi dari Tugas Akhir.



Gambar 3.1 Flowchart Metodologi Penyelesaian Tugas Akhir

Berikut ini merupakan penjelasan rinci dari *flowchart* metodologi penyelesaian Tugas Akhir pada Gambar 3.1:

Langkah 1 : Metodologi dimulai dari penentuan tujuan, perumusan masalah, dan tinjauan pustaka.

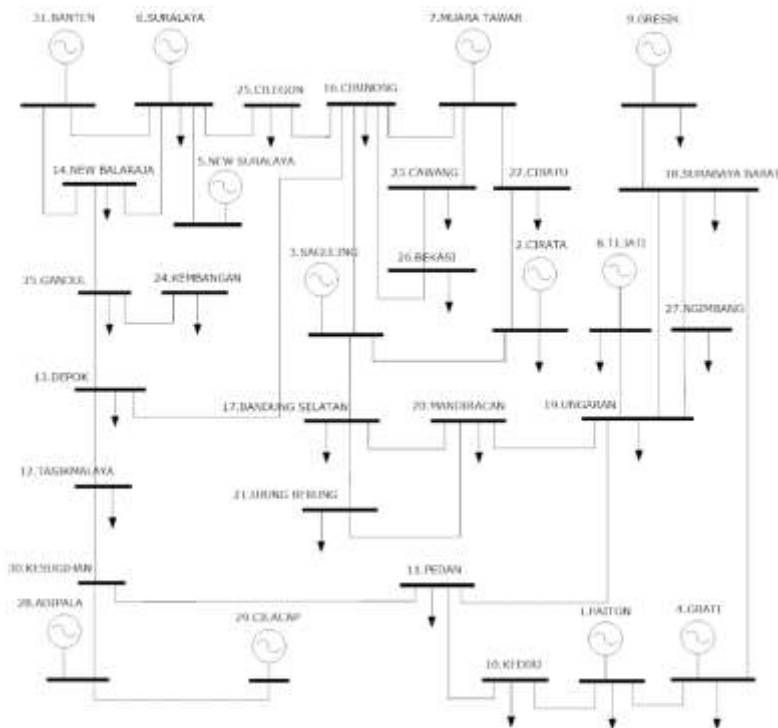
Langkah 2 : Pengumpulan data meliputi data pembangkitan, data pembebanan, data saluran dan data transformator pada

- sistem Jamali 500 kV tahun 2017. Data yang digunakan diambil dari PT. PLN P2B Jawa-Bali.
- Langkah 3 : Membuat pemodelan pada Matlab dan ETAP. Pemodelan sedapat mungkin sama dengan sistem *real*, maka dari itu transformator turut dimodelkan pada Tugas Akhir ini. Pemodelan pada Matlab menggunakan metode Newton Raphson berdasarkan referensi [10].
 - Langkah 4 : Mensimulasikan *loadflow* (aliran daya) pada Matlab dan ETAP.
 - Langkah 5 : Hasil aliran daya dari Matlab dan ETAP dianalisa. Hasil aliran daya ada Matlab divalidasi dengan ETAP sehingga memperoleh hasil yang sama. Data yang dituliskan di Matlab merupakan data yang akan diolah untuk proses selanjutnya.
 - Langkah 6 : Menghitung indeks sensitivitas dari saluran menggunakan *Sensitivity Methods* kemudian dirangking dan diobservasi.
 - Langkah 7 : Melakukan *sizing* pada TCSC sebesar 70% kapasitif (-0.7), hal ini dilakukan berdasarkan referensi [1].
 - Langkah 8 : Mensimulasikan aliran daya setelah penempatan TCSC sesuai hasil *Sensitivity Methods* dengan *sizing* 0,7 kapasitif. Kemudian menghitung penurunan aliran daya pada saluran.
 - Langkah 9 : Melakukan optimasi pada *sizing* TCSC dengan metode GSA dan PSO.
 - Langkah 10 : Mensimulasikan aliran daya setelah penempatan TCSC sesuai hasil *Sensitivity Methods* dengan *sizing* sesuai hasil optimasi dengan metode GSA dan PSO. Kemudian menghitung penurunan aliran daya pada saluran.
 - Langkah 11 : Melakukan perbandingan hasil simulasi dan melakukan analisa.
 - Langkah 12 : Dari analisa yang telah dilakukan ditarik kesimpulan. Saluran dan *sizing* dimana TCSC ditempatkan menghasilkan penurunan aliran daya terbesar, dipilih sebagai lokasi dan *sizing* dari TCSC yang optimal.

3.2 Data Sistem Kelistrikan Jamali 500 kV

Data sistem kelistrikan Jamali 500 kV Tahun 2017 yang digunakan adalah data yang diperoleh dari PT. PLN P2B (Pusat Pengatur Beban) Gandul, Depok, Jakarta per tanggal 24 Maret 2017. Data berupa *logsheet* kemudian diolah sesuai dengan pemodelan yang telah ditentukan.

Sistem kelistrikan Jamali 500 kV tahun 2017 terdiri dari 31 gardu induk. Setiap gardu induk terdiri dari beberapa bus generator, beberapa transformator dan satu bus beban. Secara garis besar sistem Jamali 500 kV tahun 2017 terdiri dari 87 bus (dengan 1 buah slack bus, 55 buah generator bus dan 31 buah load bus) dan 94 saluran. Sistem ini memiliki nilai bus tegangan sebesar 500 kV dan base daya sebesar 100 MVA. *Single line diagram* sistem kelistrikan Jamali 500 kV tahun 2017 ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



Gambar 3.2 *Single Line Diagram* Sistem Kelistrikan Jamali 500 kV Tahun 2017

Tabel 3.1 dibawah ini merupakan data pembangkitan dan pembebanan pada masing-masing gardu induk pada sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017. Untuk data detail dari pembangkitan setiap generator dapat dilihat pada *lampiran 1*.

Tabel 3.1. Data Bus GI (Gardu Induk) Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017

No Bus	Nama Bus	Load		Generation	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	Paiton	839	162	3984	0
2	Cirata	550	201	355	0
3	Saguling	0	0	574	0
4	Grati	512	217	450	0
5	New Suralaya	69	24	470	0
6	Suralaya	80	79	2395	0
7	Muara Tawar	0	0	1084	0
8	Tanjung Jati	263	42	1906	0
9	Gresik	117	-89	1159	0
10	Kediri	444	134	0	0
11	Pedan	657	194	0	0
12	Tasikmalaya	166	67	0	0
13	Depok	517	-82	0	0
14	New Balaraja	946	134	0	0
15	Gandul	919	-106	0	0
16	Cibinong	364	173	0	0
17	Bandung Selatan	439	174	0	0
18	Surabaya Barat	1284	518	0	0
19	Unggaran	1915	143	0	0
20	Mandirancang	0	68	0	0
21	Ujung Berung	0	-78	0	0
22	Cibatu	878	566	0	0

Tabel 3.1. Data Bus GI (Gardu Induk) Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017 (lanjutan)

No Bus	Nama Bus	Load		Generation	
		MW	MVAR	MW	MVAR
23	Cawang	710	150	0	0
24	Kembangan	0	0	0	0
25	Cilegon	122	281	0	0
26	Bekasi	1061	-73	0	0
27	Ngimbang	358	83	0	0
28	Adipala	0	0	0	0
29	Cilacap	0	0	689	0
30	Kesugihan	0	0	0	0
31	Banten	0	0	0	0
TOTAL		13209.6918	2982.2245	13064.4300	0.0000

Sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 terdiri dari 31 gardu induk dimana 12 diantaranya merupakan generator bus. Generator pada setiap gardu induk jumlahnya bermacam-macam. Paiton memiliki 8 generator, Cirata memiliki 8 generator dengan 5 generator yang aktif, Saguling memiliki 4 generator, Grati memiliki 6 generator dengan 4 generator yang aktif, New Suralaya memiliki 1 generator, Suralaya memiliki 7 generator, Muara Tawar memiliki 14 generator dengan 8 generator yang aktif, Tanjung Jati memiliki 4 generator, Gresik memiliki 18 generator dengan 12 generator aktif, Cilacap memiliki 3 generator, dan Adipala memiliki 1 generator namun belum aktif.

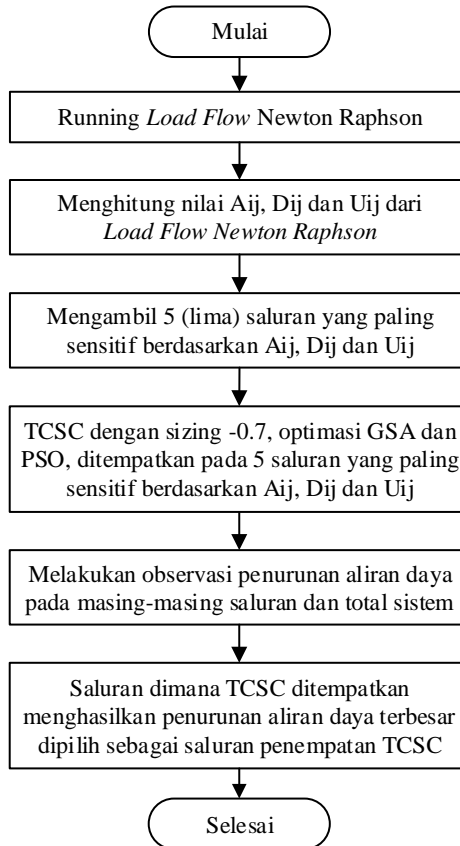
Line data transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 dapat dilihat pada lampiran 2. Sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 total terdiri dari 94 line, dimana 38 line merupakan saluran transmisi 500 kV dan sisanya 56 line merupakan pemodelan dari transformator. Line 1 sampai line 38 merupakan pemodelan saluran transmisi 500 kV dan line 38 sampai line 94 merupakan pemodelan dari transformator. Transformator merupakan transformator step up dari generator ke jaringan transmisi 500 kV.

3.3 Penempatan TCSC dengan *Sensitivity Methods*

Seperti yang telah dipaparkan pada subbab 2.4 dalam menghitung sensitivitas saluran digunakan 3 metode yaitu:

1. Pengurangan pada total rugi – rugi daya reaktif (A_{ij})
2. Pengurangan pada total rugi – rugi daya aktif (D_{ij})
3. Pengurangan pada aliran daya aktif (U_{ij})

Gambar 3.3 di bawah ini merupakan diagram alir tahap – tahap menentukan penempatan TCSC dengan menggunakan *sensitivity methods*.



Gambar 3.3 Diagram Alir Penempatan TCSC

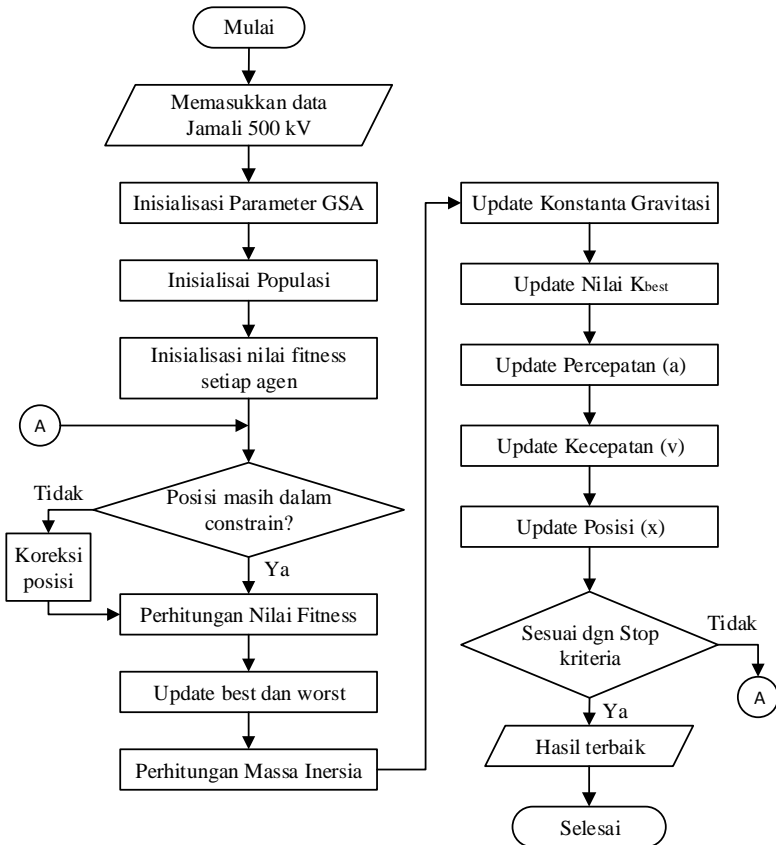
Penjelasan dari diagram alir penempatan TCSC pada Gambar 3.2 adalah sebagai berikut:

- Langkah 1 : Melakukan simulasi aliran daya Newton Raphson dari permodelan yang telah dibuat di Matlab.
- Langkah 2 : Menghitung rumus Aij, Dij, dan Uij untuk masing – masing saluran. Rumus dari Aij, Dij, dan Uij seperti pada persamaan (2.57), (2,59), dan (2.61) pada Bab 2.
- Langkah 3 : Dari indeks yang diperoleh, merangking indeks masing – masing Aij, Dij, dan Uij. Untuk indeks Aij dan Dij dirangking dari yang paling positif sementara untuk indeks Uij dirangking dari yang paling negative. Kemudian diambil 5 saluran yang paling sensitive berdasarkan Aij, Dij, dan Uij.
- Langkah 4 : TCSC dengan sizing 70% kapasitas (-0,7) ditempatkan pada kelima saluran tersebut. Begitu pula TCSC dengan sizing yang dioptimasi oleh GSA dan PSO.
- Langkah 5 : Melakukan simulasi penempatan TCSC dengan sizing pada langkah 4, kemudian dilakukan observasi masing - masing metode Aij, Dij, dan Uij. Menghitung penurunan aliran daya masing - masing saluran dan penurunan daya total pada sistem.
- Langkah 6 : Saluran dimana TCSC ditempatkan menghasilkan aliran daya yang paling optimal dipilih sebagai saluran penempatan TCSC yang optimal.

3.4 Optimasi Sizing TCSC dengan GSA

Untuk melakukan optimasi dalam menentukan besarnya sizing dari TCSC maka dipilih metode kecerdasan buatan GSA. Berdasarkan referensi [9] GSA memiliki performa lebih baik daripada algoritma program lain seperti PSO, DE, dan GA.

Pada Tugas Akhir kali ini, keluaran atau hasil dari metode GSA akan dibandingkan dengan metode PSO. Gambar 3.4 merupakan diagram alir dari algoritma GSA untuk menentukan *sizing* dari TCSC.



Gambar 3.4 Diagram Alir Algoritma GSA

Penjelasan dari diagram alir algoritma GSA pada Gambar 3.4 adalah sebagai berikut:

Langkah 1 : Memasukan data – data Jamali 500 Kv tahun 2017 sesuai aliran daya pada Newton Raphson.

Langkah 2 : **Inisialisasi parameter GSA**

Merupakan tahapan untuk menentukan nilai awal dari parameter GSA. Parameter tersebut antara lain R_{power} , R_{norm} , α , G_0 (konstanta gravitasi) dan $final_per$.

Langkah 3 : **Inisialisasi populasi**

Membangkitkan populasi awal secara random, namun dalam batas -0.7 sampai 0.2. Batas tersebut sesuai dari TCSC yang memiliki range antara -0.7 Xline sampai 0.2 Xline dimana Xline adalah reaktansi saluran transmisi dimana TCSC terpasang.

Langkah 4 : **Inisialisasi nilai fitness**

Pada tahapan ini nilai fitness sebagai nilai awal akan dihitung terlebih dahulu.

Langkah 5 : **Memasuki iterasi utama**

Tahap ini merupakan tahap memasuki iterasi utama dari algoritma GSA, dimana tahap paling awal adalah memastikan nilai dari posisi dalam batas yang telah ditentukan.

Langkah 6 : **Perhitungan nilai fitness**

Nilai *fitness* merupakan fungsi obyektif yang akan dievaluasi untuk masing – masing *agent* pada populasi. *Fitness* merupakan perhitungan kualitas yang digunakan untuk membandingkan solusi yang berbeda. *Fitness* terbaik dan terburuk dihitung pada setiap iterasi. Dalam Tugas Akhir ini fungsi *fitness* pada metode GSA adalah memaksimalkan penurunan aliran daya total sistem pada saluran.

Langkah 7 : **Update best dan worst**

Melakukan update best dan worst dengan persamaan (2.78) pada bab 2.

Langkah 8 : **Perhitungan Massa**

Menghitung massa gravitasi (*m*) dan massa Inersia (*M*) untuk setiap agen menggunakan persamaan (2.76) dan (2.77)..

Langkah 9 : **Update konstanta gravitasi**

Pada step ini dilakukan update konstanta gravitasi (*G*) sesuai dengan populasi fitness agen yang terbaik (minimal) dan terburuk (maksimal) menggunakan persamaan :

$$G(t) = G_0 \exp\left(-\alpha \frac{t}{T}\right) \quad (3.1)$$

G_0 = nilai awal dari konstanta gravitasi yang dipilih secara acak

α = konstanta

t = jumlah iterasi

T = jumlah iterasi total

Langkah 10 : **Update nilai K_{best}**

Melakukan update nilai K_{best} dengan menggunakan Persamaan (2.80)

Langkah 11 : **Update percepatan**

Melakukan update percepatan dengan menggunakan Persamaan (2.71)

Langkah 12 : **Update kecepatan**

Melakukan update kecepatan dengan menggunakan Persamaan (2.72)

Langkah 13 : **Update posisi**

Pada step ini posisi berikutnya dari agen i akan diperbarui dengan menggunakan Persamaan (2.73)

Langkah 14 : **Pengulangan**

Pada langkah ini, langkah 5 sampai langkah 13 diulang sampai iterasi mencapai kriteria. Nilai yang dihasilkan merupakan solusi global dari masalah optimasi.

3.5 Optimasi Sizing TCSC dengan PSO

Particle Swarm Optimization (PSO) pertama kali diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995 [30]. Algoritma ini terinspirasi perilaku sosial kolektif dari kecerdasan koloni binatang, seperti burung dan ikan. Perilaku sosial ini berupa tindakan individu dan pengaruh dari individu-individu lain dalam suatu kelompok. Setiap individu atau partikel berperilaku secara terdistribusi dengan cara menggunakan kecerdasannya sendiri dan juga dipengaruhi perilaku kelompok kolektifnya. Jika satu partikel atau seekor burung menemukan jalan yang tepat atau pendek menuju ke sumber makanan, maka sisa kelompok yang lain juga akan dapat segera mengikuti jalan tersebut meskipun lokasi mereka jauh dari kelompok tersebut. Selama proses pencarian, setiap partikel menentukan posisinya sendiri berdasarkan pengalaman terbaiknya sendiri (nilai ini yang disebut P_{best}) dan berdasarkan pengalaman terbaik dari semua partikel (nilai ini disebut G_{best}) [33].

Secara garis besar algoritma PSO tidak jauh berbeda dari algoritma GSA. Perbedaannya hanya pada *update* kecepatan, dimana persamaan *update* kecepatan dari PSO adalah sebagai berikut:

$$V_j(i) = k \cdot V_j(i-1) + c_1 r_1 [P_{best,j} - x_j(i-1)] + c_2 r_2 [G_{best,j} - x_j(i-1)] \quad (3.2)$$

Keterangan:

V_j = Kecepatan partikel j pada iterasi ke- i

c_1 = Konstanta positif untuk kemampuan individu

$P_{best,j}$ = Posisi terbaik partikel berdasarkan pengalaman partikel itu sendiri

$G_{best,j}$ = Posisi terbaik partikel berdasarkan pengalaman semua partikel

c_2 = Konstanta positif untuk pengaruh sosial

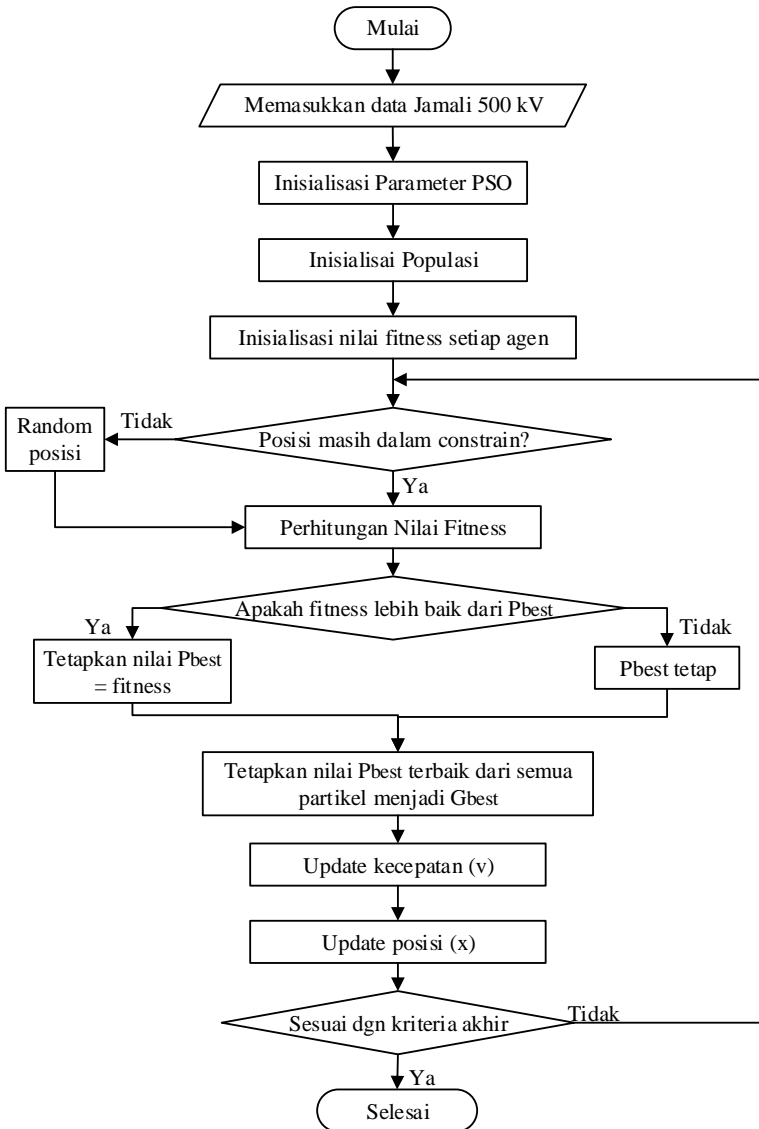
x_j = Posisi partikel saat ini

r_1 = Bilangan acak antara 0 sampai 1

r_2 = Bilangan acak antara 0 sampai 1

c_1 dan c_2 masing-masing adalah *learning rates* untuk kemampuan individu (*cognitive*) dan pengaruh sosial (kelompok), dan r_1 dan r_2 merupakan bilangan random yang berdistribusi *uniform* dalam interval 0 sampai 1. Jadi parameter c_1 dan c_2 biasanya adalah 2 sehingga perkalian $c_1 r_1$ dan $c_2 r_2$ memastikan bahwa partikel-partikel akan mendekati target sekitar setengah selisihnya.

Ga,bar 3.5 merupakan diagram alir dari algoritma PSO untuk menentukan *sizing* dari TCSC pada saluran transmisi.



Gambar 3.5 Diagram Alir Algoritma PSO

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dijelaskan hasil dan analisa dari simulasi penempatan dan *sizing* TCSC pada sistem tenaga listrik Jamali 500 kV tahun 2017. Dimana hasil akhir yang ingin diperoleh yaitu mengetahui efek dari pemasangan TCSC terhadap penurunan aliran daya total sistem pada saluran dan peningkatan P_{maks} (daya maksimum yang dapat ditransfer pada saluran) dan juga efek lain yaitu tegangan. Dengan melihat adanya penurunan aliran daya pada saluran, maka kapabilitas saluran dalam menyalurkan daya semakin meningkat atau dengan kata lain *power transfer capability* pada saluran meningkat.

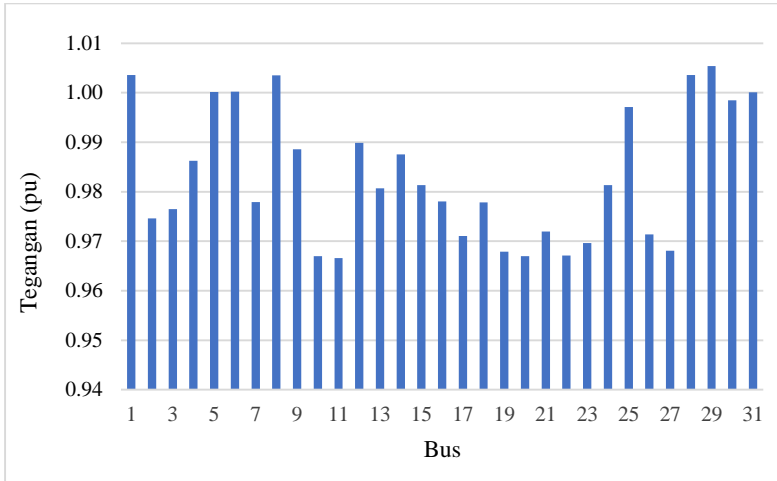
Sensitivity Methods digunakan untuk menentukan lokasi TCSC. Ada 3 metode dalam menentukan sensitivitas pada saluran yaitu Aij (berdasarkan rugi-rugi daya reaktif), Dij (berdasarkan rugi-rugi daya aktif) dan Uij (berdasarkan aliran daya pada saluran). Dari ketiga metode tersebut akan diranking dan diambil lima saluran paling sensitif. Kemudian menentukan *sizing* pada saluran TCSC. Simulasi dilakukan melalui 4 tahapan yaitu sebagai berikut :

1. Simulasi aliran daya sebelum dilakukan penempatan TCSC
2. Simulasi aliran daya sesudah dilakukan penempatan TCSC sesuai metode sensitivity dengan *sizing* 70% dari kapasitas TCSC
3. Simulasi aliran daya sesudah dilakukan penempatan TCSC sesuai metode sensitivity dengan *sizing* menggunakan optimasi GSA (*Gravitational Search Algorithm*)
4. Simulasi aliran daya sesudah dilakukan penempatan TCSC sesuai metode sensitivity dengan *sizing* menggunakan optimasi PSO (*Particle Swarm Optimization*)
5. Simulasi aliran daya dengan adanya kontingensi n - 1 sebelum dan sesudah pemasangan TCSC dengan penempatan dan *sizing* sesuai hasil pada point 3.

4.1 Aliran Daya sebelum Penempatan TCSC

Simulasi aliran daya sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 sebelum penempatan TCSC dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sistem transmisi Jamali 500 kV. Kondisi awal yang dimaksud adalah nilai tegangan pada tiap bus sistem, besar aliran daya yang terjadi dan besarnya

P_{maks} pada saluran. Gambar 4.1 merupakan grafik tegangan pada setiap bus saluran transmisi 500 kV Jamali tahun 2017.



Gambar 4.1 Grafik Tegangan Sebelum Penempatan TCSC

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa sebelum penempatan TCSC tegangan pada bus sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 berada diantara 0.96-1.01 per unit. Nilai tersebut berada dalam batas normal tegangan sesuai peraturan PLN yaitu $1 \pm 5\%$ per unit. Untuk detail pembangkitan daya aktif dan reaktif masing-masing bus, pembebanan pada masing-masing bus dan juga tegangan pada masing-masing bus generator dapat dilihat pada *lampiran 4*.

Tabel 4.1 dibawah ini merupakan hasil simulasi aliran daya sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 sebelum dilakukan penempatan TCSC. Dari Tabel 4.1 kita dapat melihat besarnya aliran daya aktif dan aliran daya reaktif eksisting pada masing-masing saluran. Hasil aliran daya aktif eksisting inilah yang nantinya digunakan sebagai acuan untuk menghitung penurunan aliran daya setelah penempatan TCSC.

Tabel 4.1. Hasil Aliran Daya dan Pmaks Saluran Sistem Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017 sebelum Penempatan TCSC

Line	From	To	Aliran Daya		Pmaks
#	#	#	MW	MVAR	#
1	1	4	1843.965	255.826	200.590
2	1	10	1297.320	263.857	84.499
3	2	22	506.400	228.515	358.043
4	3	2	702.370	60.049	671.697
5	3	17	-364.933	275.312	432.937
6	5	6	-345.035	-11.223	7110.250
7	5	31	745.594	119.834	18488.727
8	6	14	1539.757	241.046	279.555
9	6	25	756.733	377.722	1423.189
10	7	22	373.267	353.530	348.823
11	7	23	751.135	87.626	175.439
12	8	19	1639.867	403.457	128.304
13	11	10	-819.926	142.632	40.690
14	11	30	175.700	-322.962	87.675
15	13	12	-684.922	-0.974	61.845
16	14	15	1326.279	99.879	338.588
17	15	13	401.875	153.956	2886.670
18	15	24	0.000	0.000	568.920
19	16	3	-235.595	43.687	207.643
20	16	7	41.617	-1.841	160.272
21	16	13	-569.369	-232.822	1094.336
22	16	26	1028.181	69.272	222.634
23	17	20	-401.732	74.330	69.902
24	17	21	-402.630	22.180	254.852
25	18	4	-1753.379	44.817	216.247

Tabel 4.1. Hasil Aliran Daya dan Pmaks Saluran Sistem Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017 sebelum Penempatan TCSC (lanjutan 1)

Line	From	To	Aliran Daya		Pmaks
#	#	#	MW	MVAR	#
26	18	9	-1038.767	-666.666	718.475
27	18	19	608.139	6.938	33.067
28	18	27	900.007	96.912	164.907
29	19	11	12.778	13.702	107.765
30	19	27	-529.656	74.357	41.538
31	20	19	-809.390	89.517	72.280
32	21	20	-403.303	93.794	96.573
33	25	16	634.285	91.712	66.378
34	26	23	-37.750	94.906	496.750
35	28	29	-688.073	-351.515	2300.035
36	28	30	688.073	351.515	791.002
37	30	12	861.890	68.574	162.199
38	31	14	745.563	119.526	137.619
Total			13332.628	3003.493	41100.917

Dari Tabel 4.1 diatas dapat diketahui bahwa pada sistem transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 sebelum dilakukan penempatan TCSC besar total aliran daya aktif sebesar 13332.628 MW dan besar aliran daya reaktif sebesar 3003.493 MVAR. Selain itu dapat diketahui P_{maks} pada total saluran sebesar 41100.917 MW.

4.2 Penempatan TCSC dengan Metode Sensitivity

Tabel 4.2 dibawah ini merupakan hasil nilai indeks sensitivitas masing-masing saluran sesuai metode *Aij*, *Dij* dan *Uij*.

Tabel 4.2. Nilai Sensitivitas Saluran Berdasarkan Metode *Aij*, *Dij* dan *Uij* Sistem Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017

Line	Bus From	Bus To	Aij	Rank	Dij	Rank	Uij	Rank
1	1	4	-339.4	1	-61.2	1	-3756.2	87
2	1	10	-173.3	6	-31.2	7	-1143.8	79
3	2	22	-31.8	26	-6.7	24	-1992.5	84
4	3	2	-51.0	19	-10.7	17	-4948.0	90
5	3	17	-21.6	37	-3.9	28	1541.6	6
6	5	6	-11.7	49	-2.4	32	24343.4	1
7	5	31	-55.8	18	-11.5	15	-138636.8	94
8	6	14	-237.6	4	-50.0	4	-4381.4	88
9	6	25	-70.4	12	-12.7	13	-11190.3	92
10	7	22	-27.0	35	-5.7	26	-1496.3	82
11	7	23	-58.5	14	-12.3	14	-1391.6	80
12	8	19	-280.5	3	-50.5	3	-2198.8	85
13	11	10	-73.4	11	-13.2	12	348.0	12
14	11	30	-12.3	46	-2.2	33	-134.7	57
15	13	12	-48.2	20	-8.7	20	430.5	10
16	14	15	-177.5	5	-37.4	5	-4620.0	89
17	15	13	-18.8	39	-4.0	27	-12400.1	93
18	15	24	0.0	94	0.0	94	0.0	16
19	16	3	-6.0	54	-1.1	38	497.3	9
20	16	7	-0.2	92	0.0	60	-68.7	52
21	16	13	-38.7	22	-8.1	21	6699.8	4
22	16	26	-108.6	8	-22.9	8	-2400.2	86
23	17	20	-17.5	41	-3.7	30	289.5	13
24	17	21	-16.9	42	-3.6	31	1069.4	7

Tabel 4.2. Nilai Sensitivitas Saluran Berdasarkan Metode *Aij*, *Dij* dan *Uij* Sistem Transmsi Jamali 500 kV Tahun 2017 (lanjutan 1)

Line	Bus From	Bus To	Aij	Rank	Dij	Rank	Uij	Rank
25	18	4	-316.6	2	-57.1	2	3891.6	5
26	18	9	-155.9	7	-32.8	6	8147.6	3
27	18	19	-37.9	23	-8.0	22	-211.1	63
28	18	27	-83.9	9	-17.6	9	-1568.4	83
29	19	11	0.0	93	0.0	85	-16.2	39
30	19	27	-30.1	30	-6.3	25	228.2	14
31	20	19	-70.2	13	-14.8	10	608.5	8
32	21	20	-17.9	40	-3.8	29	399.3	11
33	25	16	-40.9	21	-7.4	23	-434.5	77
34	26	23	-1.1	73	-0.2	53	145.4	15
35	28	29	-58.4	16	-10.2	18	16257.6	2
36	28	30	-58.4	15	-10.2	19	-5630.1	91
37	30	12	-74.1	10	-13.3	11	-1415.8	81
38	31	14	-55.9	17	-11.3	16	-1045.1	78
39	32	6	-12.0	48	-0.5	48	-135.6	58
40	33	6	-12.3	47	-0.5	46	-137.5	59
41	34	6	-13.4	45	-0.5	43	-143.2	60
42	35	6	-2.3	59	-0.1	58	-59.1	51
43	36	6	-10.2	51	-0.4	52	-199.9	61
44	37	6	-30.6	28	-1.2	35	-346.0	74
45	38	6	-30.6	29	-1.2	36	-346.0	75
46	39	5	-20.7	38	-0.8	39	-284.4	68
47	40	7	-3.9	55	0.0	59	-33.8	50
48	41	7	-1.9	69	0.0	71	-14.8	36

Tabel 4.2. Nilai Sensitivitas Saluran Berdasarkan Metode *Aij*, *Dij* dan *Uij* Sistem Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017 (lanjutan 2)

Line	Bus From	Bus To	Aij	Rank	Dij	Rank	Uij	Rank
49	42	7	-1.9	68	0.0	70	-14.8	37
50	43	7	-1.9	67	0.0	69	-14.9	38
51	44	7	-1.7	71	0.0	73	-14.4	34
52	45	7	-1.8	70	0.0	72	-14.5	35
53	46	7	-0.6	88	0.0	86	-12.2	29
54	47	7	-2.1	65	0.0	64	-24.5	46
55	48	2	-0.6	85	0.0	88	-10.8	20
56	49	2	-0.6	86	0.0	89	-10.8	21
57	50	2	-0.7	84	0.0	87	-10.9	23
58	51	2	-0.6	89	0.0	91	-10.6	19
59	52	2	-0.6	87	0.0	90	-10.8	22
60	53	3	-2.2	60	0.0	65	-22.1	45
61	54	3	-2.2	63	0.0	66	-21.9	44
62	55	3	-2.1	64	0.0	67	-21.8	43
63	56	3	-2.0	66	0.0	68	-21.2	42
64	57	8	-13.7	44	-0.5	42	-231.1	64
65	58	8	-31.1	27	-1.2	34	-348.2	76
66	59	8	-14.6	43	-0.6	40	-238.4	65
67	60	8	-28.7	33	-1.1	37	-334.8	72
68	61	9	-0.2	90	0.0	92	-5.3	18
69	62	9	-0.2	91	0.0	93	-5.3	17
70	63	9	-0.9	78	0.0	83	-17.3	40
71	64	9	-0.9	79	0.0	84	-17.3	41
72	65	9	-2.2	61	0.0	62	-26.9	48
73	66	9	-2.2	62	0.0	63	-26.8	47

Tabel 4.2. Nilai Sensitivitas Saluran Berdasarkan Metode *Aij*, *Dij* dan *Uij* Sistem Transmsi Jamali 500 kV Tahun 2017 (lanjutan 3)

Line	Bus From	Bus To	Aij	Rank	Dij	Rank	Uij	Rank
74	67	9	-0.9	76	0.0	77	-12.2	30
75	68	9	-0.9	81	0.0	80	-12.0	27
76	69	9	-0.9	75	0.0	76	-12.3	31
77	70	9	-0.8	82	0.0	81	-11.6	24
78	71	9	-0.8	83	0.0	82	-11.6	25
79	72	9	-1.1	72	0.0	74	-13.4	33
80	73	4	-1.0	74	0.0	75	-12.3	32
81	74	4	-0.9	80	0.0	79	-12.0	26
82	75	4	-0.9	77	0.0	78	-12.1	28
83	76	4	-2.5	58	0.0	61	-28.0	49
84	77	1	-8.9	52	-0.1	54	-116.7	56
85	78	1	-8.7	53	-0.1	55	-115.5	55
86	79	1	-31.9	25	-0.5	44	-339.1	73
87	80	1	-29.5	32	-0.5	47	-294.3	69
88	81	1	-29.8	31	-0.5	45	-295.5	70
89	82	1	-34.8	24	-0.6	41	-319.4	71
90	83	1	-26.5	36	-0.4	51	-278.9	66
91	84	1	-27.4	34	-0.5	50	-283.8	67
92	85	29	-2.7	57	-0.1	57	-100.5	53
93	86	29	-2.8	56	-0.1	56	-101.1	54
94	87	29	-11.5	50	-0.5	49	-210.8	62

Berdasarkan Tabel 4.2 di atas berikut merupakan *summary* urutan hasil sensitivitas saluran :

Tabel 4.3. Urutan Sensitivitas Saluran berdasarkan *Sensitivity Method* pada Sistem Transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017

Rank	Aij		Dij		Uij	
#	Line	From-To	Line	From-To	Line	From-To
1	1	(1-4)	1	(1-4)	6	(5-6)
2	25	(18-4)	25	(18-4)	35	(28-29)
3	12	(8-19)	12	(8-19)	26	(18-9)
4	8	(6-14)	8	(6-14)	21	(16-13)
5	16	(14-15)	16	(14-15)	25	(18-4)

Dari Tabel 4.3. dapat dilihat bahwa terdapat kesamaan urutan indeks sensitivitas antara metode Aij dengan metode Dij. Saluran-saluran pada Tabel 4.3 akan dilihat penurunan aliran daya setelah dilakukan penempatan TCSC.

4.3 Aliran Daya setelah Penempatan TCSC dengan *Sizing -0.7*[1]

Pada subbab ini akan dijelaskan penempatan TCSC berdasarkan rangking sensitivitas saluran sesuai Tabel 4.3. Penempatan TCSC menggunakan kompensasi 70%. Hal tersebut berdasarkan referensi [1]. Tabel 4.4 dibawah ini menunjukkan penurunan aliran daya total pada saluran transmisi Jamali 500 kV tahun 2017 sesuai dengan rangking sensitivitas pada metode *Aij*, *Dij* dan *Uij* setelah penempatan TCSC dengan *sizing* 70%.

Tabel 4.4. Penurunan Aliran Daya Setelah Penempatan TCSC dengan Sizing -0.7

Metode	Line	Bus		Rating	Penurunan Aliran Daya
	#	From	To	TCSC	(MW)
Aij / Dij	1	1	4	-0.7	235.611
	25	18	4	-0.7	204.155
	12	8	19	-0.7	-0.841
	8	6	14	-0.7	-364.459
	16	14	15	-0.7	352.116
Uij	6	5	6	-0.7	7.500
	35	28	29	-0.7	-0.316
	26	18	9	-0.7	3.955
	21	16	13	-0.7	45.359
	25	18	4	-0.7	204.155

Dari Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa penurunan daya yang paling besar terjadi saat TCSC ditempatkan pada saluran 8 atau saluran dari bus 6 ke 14 yaitu dari Suralaya ke Balaraja sebesar 364.459 MW. Tanda minus menandakan adanya penurunan aliran daya. Berikut merupakan detail penurunan aliran daya total sistem setelah pemasangan TCSC pada saluran 6-14 dengan kompensasi 70% kapasitif.

Tabel 4.5. Penurunan Aliran Daya pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan Sizing -0.7

Line #	From #	To #	Aliran Daya (MW)		Penurunan (MW)	Losses (Mvar)	
			Before	After		Before	After
1	1	4	1843.965	1844.091	0.162	139.395	139.399
2	1	10	1297.320	1297.195	-0.162	131.889	131.730
3	2	22	506.400	506.613	0.280	8.554	8.497
4	3	2	702.370	702.578	0.275	7.384	7.380
5	3	17	-364.933	-366.347	1.776	4.800	4.877

Tabel 4.5. Penurunan Aliran Daya pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan *Sizing* -0.7 (lanjutan 1)

Line #	From #	To #	Aliran Daya (MW)		Penurunan (MW)	Losses (Mvar)	
			Before	After		Before	After
6	5	6	-345.035	0.000	-259.279	0.168	0.010
7	5	31	745.594	400.565	-430.783	0.308	0.060
8	6	14	1539.757	2017.477	596.993	85.781	48.776
9	6	25	756.733	626.424	-162.599	5.011	3.430
10	7	22	373.267	373.053	-0.282	7.493	7.536
11	7	23	751.135	751.034	-0.112	32.321	32.160
12	8	19	1639.867	1639.869	0.003	173.331	173.067
13	11	10	-819.926	-819.820	-0.137	140.600	140.453
14	11	30	175.700	174.278	-1.791	-47.530	-47.589
15	13	12	-684.922	-683.581	-1.690	-10.666	-11.607
16	14	15	1326.279	1455.667	161.557	51.920	65.009
17	15	13	401.875	530.184	160.195	0.641	1.196
18	15	24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	16	3	-235.595	-236.795	1.495	-22.515	-22.473
20	16	7	41.617	41.293	-0.403	0.108	0.111
21	16	13	-569.369	-696.136	158.247	3.467	5.382
22	16	26	1028.181	1028.256	0.081	47.374	47.215
23	17	20	-401.732	-402.441	0.891	5.914	5.973
24	17	21	-402.630	-403.340	0.892	6.386	6.403
25	18	4	-1753.379	-1753.505	0.162	143.478	143.481
26	18	9	-1038.767	-1038.770	0.003	21.438	21.412
27	18	19	608.139	608.209	0.090	72.112	72.093
28	18	27	900.007	900.065	0.075	49.192	49.181
29	19	11	12.778	11.461	-1.654	0.033	0.028
30	19	27	-529.656	-529.715	0.075	39.076	39.069

Tabel 4.5. Penurunan Aliran Daya pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan *Sizing* -0.7 (lanjutan 2)

Line #	From #	To #	Aliran Daya (MW)		Penurunan (MW)	Losses (Mvar)	
			Sebelum	Sesudah		Sebelum	Sesudah
31	20	19	-809.390	-810.825	1.804	23.421	23.719
32	21	20	-403.303	-404.014	0.894	4.693	4.747
33	25	16	634.285	504.093	-162.458	40.416	13.562
34	26	23	-37.750	-37.661	-0.098	0.210	0.232
35	28	29	-688.073	-688.080	0.008	2.600	2.575
36	28	30	688.073	688.080	0.008	7.509	7.436
37	30	12	861.890	860.480	-1.776	11.267	10.888
38	31	14	745.563	400.555	-430.758	40.910	7.945
Total			13332.628	12968.168	-364.459	2671.458	2404.831

Dari Tabel 4.5 di atas dapat dilihat penurunan aliran daya masing-masing bus sehingga didapatkan penurunan aliran daya total pada sistem sebesar 364.459 MW. Jika dilihat dari rugi-rugi saluran, rugi-rugi daya reaktif total sistem setelah penempatan TCSC lebih kecil yaitu 2404.831 MVAR dibandingkan rugi-rugi daya reaktif sebelum penempatan TCSC sebesar 2495.878 MVAR. Dari Tabel 4.5 diatas juga dapat diketahui dari 38 saluran transmisi 500 kV, 15 saluran mengalami penurunan daya setelah penempatan TCSC, 18 saluran mengalami kenaikan aliran daya dan 5 saluran aliran dayanya tetap. Penurunan aliran daya setelah penempatan TCSC dapat dikatakan signifikan karena walaupun terdapat 18 saluran yang mengalami kenaikan aliran daya, namun secara total terjadi penurunan aliran daya sebesar 364.459 MW atau 2.73% dari aliran daya total.

Tabel 4.6. Kenaikan Pmaks pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan *Sizing* -0.7

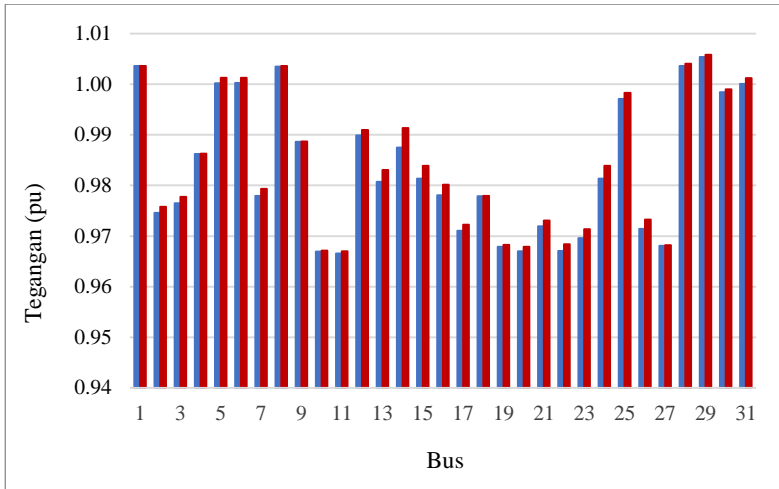
Line	Saluran		Pmaks (MW)		Peningkatan (MW)
	From	To	Before	After	
1	1	4	200.590	200.609	0.019
2	1	10	84.499	84.517	0.018
3	2	22	358.043	358.985	0.942
4	3	2	671.697	673.435	1.738
5	3	17	432.937	434.051	1.114
6	5	6	7110.250	7125.225	14.974
7	5	31	18488.727	18529.491	40.764
8	6	14	279.555	936.416	656.862
9	6	25	1423.189	1426.302	3.113
10	7	22	348.823	349.804	0.981
11	7	23	175.439	176.009	0.570
12	8	19	128.304	128.366	0.063
13	11	10	40.690	40.715	0.024
14	11	30	87.675	87.759	0.084
15	13	12	61.845	62.062	0.218
16	14	15	338.588	340.771	2.183
17	15	13	2886.670	2901.067	14.396
18	15	24	568.920	571.833	2.913
19	16	3	207.643	208.368	0.725
20	16	7	160.272	160.848	0.577
21	16	13	1094.336	1099.356	5.020
22	16	26	222.634	223.543	0.909
23	17	20	69.902	70.055	0.153
24	17	21	254.852	255.463	0.610
25	18	4	216.247	216.279	0.032

Tabel 4.6. Kenaikan Pmaks pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan *Sizing* -0.7 (lanjutan 1)

Line	Saluran		Pmaks (MW)		Peningkatan (MW)
	From	To	Before	After	
26	18	9	718.475	718.590	0.116
27	18	19	33.067	33.082	0.015
28	18	27	164.907	164.946	0.039
29	19	11	107.765	107.850	0.084
30	19	27	41.538	41.559	0.021
31	20	19	72.280	72.374	0.094
32	21	20	96.573	96.775	0.202
33	25	16	66.378	66.599	0.221
34	26	23	496.750	498.605	1.855
35	28	29	2300.035	2301.995	1.961
36	28	30	791.002	791.783	0.781
37	30	12	162.199	162.465	0.265
38	31	14	137.619	138.307	0.688
Total			41100.917	41856.261	755.344

Dari Tabel 4.6 diatas dapat dilihat bahwa setelah penempatan TCSC pada saluran 8 terdapat kenaikan P_{maks} pada saluran 8 sendiri sebesar 656.862 MW dan secara total sistem terdapat kenaikan P_{maks} sebesar 755.344 MW. Hal tersebut menandakan bahwa setelah pemasangan TCSC dengan metode sensitivitas dan *sizing* dengan 70% kompensasi kapasitif didapatkan kenaikan P_{maks} secara total sistem sebesar 1.84%.

Gambar 4.2 berikut ini merupakan hasil tegangan dari bus setelah dilakukan penempatan TCSC pada saluran 6-14 dengan ukuran kompensasi 70% kapasitif.



Gambar 4.2 Grafik Tegangan Setelah Penempatan TCSC dengan *Sizing -0.7*

Tegangan pada masing-masing bus setelah penempatan TCSC dan *sizing* dengan kompensasi 70% kapasitif berada pada range 0.96 pu – 1.01 pu. Apabila dilihat secara detail nilai tegangan setelah penempatan TCSC mengalami kenaikan di beberapa bus dibandingkan sebelum dilakukan penempatan TCSC.

4.4 Aliran Daya setelah Penempatan TCSC dengan Metode Optimasi GSA (*Gravitational Search Algorithm*)

Pada sub bab ini dilakukan simulasi penempatan TCSC pada saluran sesuai dengan indeks sensitivitas A_{ij} , D_{ij} , U_{ij} dimana *sizing* TCSC optimal didapatkan dengan metode GSA (*Gravitational Search Algorithm*). Dari penempatan TCSC tersebut akan dilihat penurunan aliran dayanya yang paling optimal.

Tabel 4.7. Penurunan Aliran Daya Setelah Penempatan TCSC dengan Metode Optimasi GSA

Metode	Line	BUS		Rating	Penurunan Aliran Daya
	#	From	To	TCSC	(MW)
Aij / Dij	1	1	4	0.194	-44.292
	25	18	4	0.200	-42.454
	12	8	19	-0.700	-0.841
	8	6	14	-0.593	-430.367
	16	14	15	0.199	-88.180
Uij	6	5	6	0.196	-2.075
	35	28	29	-0.699	-0.316
	26	18	9	0.197	-1.043
	21	16	13	0.193	-11.917
	25	18	4	0.200	-42.454

Pada Tabel 4.7 diatas dapat dilihat bahwa penurunan daya yang paling besar terjadi saat TCSC ditempatkan pada saluran 8 atau saluran dari bus 6 ke 14. Hasil tersebut sama dengan penempatan TCSC dengan *sizing* -0.7. Perbedaannya adalah hasil penurunan daya dengan metode optimasi GSA lebih besar yaitu 430.367 MW dibandingkan dengan penurunan daya sebelum menggunakan metode optimasi yaitu 364.459 MW. Berikut merupakan detail aliran daya total sistem.

Tabel 4.8. Penurunan Aliran Daya pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan *Sizing* GSA

Line #	From #	To #	Aliran Daya (MW)		Penurunan (MW)	Losses (Mvar)	
			Before	After		Before	After
1	1	4	1843.965	1844.091	0.126	139.395	139.396
2	1	10	1297.320	1297.195	-0.125	131.889	131.759
3	2	22	506.400	506.613	0.213	8.554	8.506
4	3	2	702.370	702.578	0.208	7.384	7.380
5	3	17	-364.933	-366.347	1.413	4.800	4.863
6	5	6	-345.035	0.000	-345.035	0.168	0.000
7	5	31	745.594	400.565	-345.029	0.308	0.093
8	6	14	1539.757	2017.477	477.721	85.781	59.174
9	6	25	756.733	626.424	-130.308	5.011	3.708
10	7	22	373.267	373.053	-0.214	7.493	7.529
11	7	23	751.135	751.034	-0.101	32.321	32.186
12	8	19	1639.867	1639.869	0.002	173.331	173.109
13	11	10	-819.926	-819.820	-0.106	140.600	140.481
14	11	30	175.700	174.278	-1.422	-47.530	-47.576
15	13	12	-684.922	-683.581	-1.341	-10.666	-11.439
16	14	15	1326.279	1455.667	129.388	51.920	62.286
17	15	13	401.875	530.184	128.309	0.641	1.074
18	15	24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	16	3	-235.595	-236.795	1.200	-22.515	-22.483
20	16	7	41.617	41.293	-0.323	0.108	0.110
21	16	13	-569.369	-696.136	126.767	3.467	4.972
22	16	26	1028.181	1028.256	0.075	47.374	47.242
23	17	20	-401.732	-402.441	0.709	5.914	5.959
24	17	21	-402.630	-403.340	0.710	6.386	6.399
25	18	4	-1753.379	-1753.505	0.126	143.478	143.479

Tabel 4.8. Penurunan Aliran Daya pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan *Sizing* GSA (lanjutan 1)

Line #	From #	To #	Aliran Daya (MW)		Penurunan (MW)	Losses (Mvar)	
			Before	After		Before	After
26	18	9	-1038.767	-1038.770	0.003	21.438	21.416
27	18	19	608.139	608.209	0.071	72.112	72.094
28	18	27	900.007	900.065	0.058	49.192	49.182
29	19	11	12.778	11.461	-1.317	0.033	0.029
30	19	27	-529.656	-529.715	0.058	39.076	39.069
31	20	19	-809.390	-810.825	1.435	23.421	23.653
32	21	20	-403.303	-404.014	0.711	4.693	4.735
33	25	16	634.285	504.093	-130.192	40.416	18.238
34	26	23	-37.750	-37.661	-0.089	0.210	0.228
35	28	29	-688.073	-688.080	0.007	2.600	2.579
36	28	30	688.073	688.080	0.007	7.509	7.448
37	30	12	861.890	860.480	-1.410	11.267	10.957
38	31	14	745.563	400.555	-345.007	40.910	12.321
Total			13332.628	12902.260	-430.367	2671.458	2422.664

Dari Tabel 4.8 dapat dilihat penurunan daya masing-masing bus dan penurunan aliran daya total setelah penempatan TCSC dengan *sizing* menggunakan optimasi GSA. Penurunan aliran daya dengan metode optimasi GSA lebih besar yaitu 430.367 MW dibandingkan dengan penurunan daya sebelum menggunakan metode optimasi yaitu 364.459 MW. Metode optimasi GSA bisa menurunkan aliran daya 65.9 MW lebih besar dibandingkan tanpa optimasi. Dari Tabel 4.8 diatas juga dapat diketahui dari 38 saluran transmisi 500 kV, 15 saluran mengalami penurunan daya setelah penempatan TCSC, 18 saluran mengalami kenaikan aliran daya dan 5 saluran aliran dayanya tetap. Penurunan aliran daya setelah penempatan TCSC dapat dikatakan signifikan karena walaupun terdapat 18 saluran yang mengalami kenaikan aliran daya, namun secara total terjadi penurunan aliran daya sebesar 3.23% dari aliran daya total.

Tabel 4.9. Kenaikan Pmaks pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan *Sizing* GSA

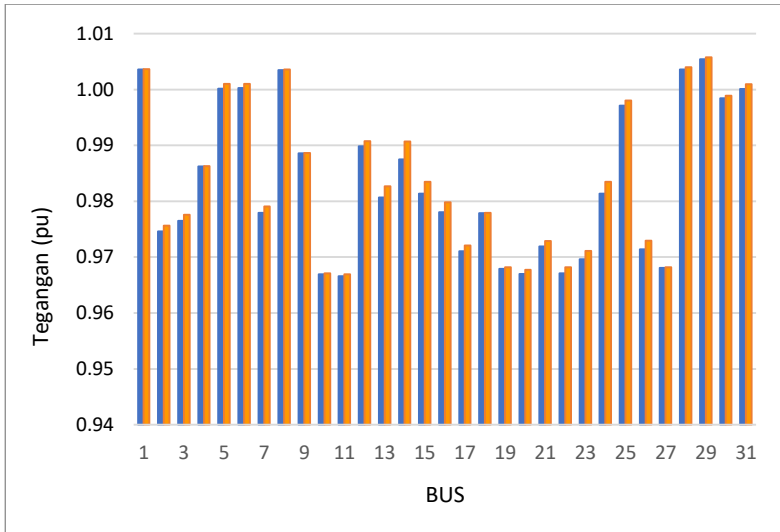
Line	Saluran		Pmaks (MW)		Kenaikan (MW)
	From	To	Before	After	
1	1	4	200.590	200.606	0.016
2	1	10	84.499	84.514	0.015
3	2	22	358.043	358.830	0.787
4	3	2	671.697	673.151	1.454
5	3	17	432.937	433.869	0.932
6	5	6	7110.250	7121.776	11.526
7	5	31	18488.727	18520.291	31.564
8	6	14	279.555	689.491	409.937
9	6	25	1423.189	1425.591	2.403
10	7	22	348.823	349.644	0.821
11	7	23	175.439	175.915	0.477
12	8	19	128.304	128.356	0.052
13	11	10	40.690	40.711	0.020
14	11	30	87.675	87.745	0.070
15	13	12	61.845	62.027	0.182
16	14	15	338.588	340.418	1.830
17	15	13	2886.670	2898.735	12.064
18	15	24	568.920	571.362	2.442
19	16	3	207.643	208.249	0.606
20	16	7	160.272	160.754	0.482
21	16	13	1094.336	1098.537	4.201
22	16	26	222.634	223.394	0.760
23	17	20	69.902	70.030	0.128
24	17	21	254.852	255.363	0.511
25	18	4	216.247	216.274	0.027

Tabel 4.9. Kenaikan Pmaks pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan *Sizing* GSA (lanjutan 1)

Line	Saluran		Pmaks (MW)		Kenaikan (MW)
	From	To	Before	After	
26	18	9	718.475	718.572	0.097
27	18	19	33.067	33.080	0.013
28	18	27	164.907	164.940	0.033
29	19	11	107.765	107.836	0.071
30	19	27	41.538	41.556	0.018
31	20	19	72.280	72.359	0.079
32	21	20	96.573	96.742	0.169
33	25	16	66.378	66.558	0.180
34	26	23	496.750	498.301	1.551
35	28	29	2300.035	2301.675	1.640
36	28	30	791.002	791.656	0.653
37	30	12	162.199	162.421	0.222
38	31	14	137.619	138.186	0.567
Total			41100.917	41589.516	488.599

Dari Tabel 4.9 diatas dapat dilihat bahwa setelah penempatan TCSC pada saluran 8 terdapat kenaikan P_{maks} pada saluran 8 sendiri sebesar 409.937 MW dan secara total sistem terdapat kenaikan P_{maks} sebesar 488.599 MW. Hal tersebut menandakan bahwa setelah pemasangan TCSC dengan metode sensitivitas dan *sizing* dengan metode optimasi GSA didapatkan kenaikan Pmaks secara total sistem sebesar 1.19%.

Gambar 4.3 berikut ini merupakan hasil tegangan dari bus setelah dilakukan penempatan TCSC pada saluran 6-14 dengan *sizing* menggunakan metode optimasi GSA.



Gambar 4.3 Grafik Tegangan Setelah Penempatan TCSC dengan *Sizing* Menggunakan Metode GSA

Tegangan pada masing-masing bus setelah penempatan TCSC dengan *sizing* dioptimasi dengan GSA sama dengan *sizing* TCSC sebelum dioptimasi yaitu antara 0.96 pu – 1.01 pu. Tegangan tersebut masih dalam batas normal yang diijinkan. Apabila dilihat lebih detail maka tegangan beberapa bus setelah penempatan TCSC dengan *sizing* menggunakan optimasi GSA naik dibandingkan tegangan sebelum dilakukan penempatan TCSC.

4.5 Aliran Daya setelah Penempatan TCSC dengan Metode Optimasi PSO (*Particle Swarm Optimization*)

Pada sub bab ini dilakukan simulasi penempatan TCSC dengan *sizing* menggunakan metode optimasi PSO. Metode optimasi PSO dipilih sebagai pembanding metode optimasi GSA. TCSC akan ditempatkan pada saluran sesuai dengan indeks sensitivitas Aij, Dij, Uij. Dari penempatan TCSC tersebut akan dilihat penurunan aliran dayanya yang paling optimal.

Tabel 4.10. Penurunan Aliran Daya Setelah Penempatan TCSC dengan Metode Optimasi PSO

Metode	Line	BUS		Rating	Penurunan Aliran Daya
	#	From	To	TCSC	(MW)
Aij / Dij	1	1	4	0.149	-40.001
	25	18	4	0.177	-40.575
	12	8	19	-0.676	-0.815
	8	6	14	-0.597	-427.907
	16	14	15	0.147	-65.772
Uij	6	5	6	0.124	-1.314
	35	28	29	-0.683	-0.308
	26	18	9	0.188	-0.995
	21	16	13	0.147	-9.114
	25	18	4	0.177	-40.575

Pada Tabel 4.10. dapat dilihat bahwa penurunan daya yang paling besar terjadi saat TCSC ditempatkan pada saluran 8 atau saluran dari bus 6 ke 14. Hasil tersebut sama dengan penempatan TCSC dengan optimasi *sizing* GSA. Perbedaannya adalah hasil optimasi penurunan aliran daya dimana *sizing* menggunakan metode optimasi GSA menghasilkan penurunan aliran daya yang lebih besar yaitu 430.367 MW dibandingkan dengan *sizing* menggunakan metode optimasi PSO yaitu 427.907 MW.

Berikut merupakan detail aliran daya total sistem setelah pemasangan TCSC pada saluran 6-14 dengan *sizing* TCSC menggunakan metode optimasi PSO.

Tabel 4.11. Penurunan Aliran Daya pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan *Sizing* PSO

Line #	From #	To #	Aliran Daya (MW)		Penurunan (MW)	Losses (Mvar)	
			Before	After		Before	After
1	1	4	1843.965	1844.092	0.127	139.395	139.396
2	1	10	1297.320	1297.193	-0.127	131.889	131.758
3	2	22	506.400	506.615	0.216	8.554	8.505
4	3	2	702.370	702.581	0.211	7.384	7.380
5	3	17	-364.933	-366.360	1.427	4.800	4.863
6	5	6	-345.035	3.214	-341.821	0.168	0.000
7	5	31	745.594	397.351	-348.243	0.308	0.092
8	6	14	1539.757	2021.943	482.187	85.781	58.811
9	6	25	756.733	625.213	-131.519	5.011	3.698
10	7	22	373.267	373.050	-0.217	7.493	7.529
11	7	23	751.135	751.034	-0.102	32.321	32.185
12	8	19	1639.867	1639.869	0.002	173.331	173.108
13	11	10	-819.926	-819.819	-0.107	140.600	140.480
14	11	30	175.700	174.264	-1.436	-47.530	-47.577
15	13	12	-684.922	-683.568	-1.354	-10.666	-11.445
16	14	15	1326.279	1456.873	130.594	51.920	62.387
17	15	13	401.875	531.379	129.504	0.641	1.078
18	15	24	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	16	3	-235.595	-236.806	1.211	-22.515	-22.482
20	16	7	41.617	41.290	-0.326	0.108	0.110
21	16	13	-569.369	-697.316	127.947	3.467	4.987
22	16	26	1028.181	1028.257	0.076	47.374	47.241
23	17	20	-401.732	-402.448	0.716	5.914	5.959
24	17	21	-402.630	-403.347	0.716	6.386	6.399
25	18	4	-1753.379	-1753.506	0.127	143.478	143.479

Tabel 4.11. Penurunan Aliran Daya pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan *Sizing* PSO (lanjutan 1)

Line #	From #	To #	Aliran Daya (MW)		Penurunan (MW)	Losses (Mvar)	
			Before	After		Before	After
26	18	9	-1038.767	-1038.770	0.003	21.438	21.416
27	18	19	608.139	608.210	0.071	72.112	72.094
28	18	27	900.007	900.066	0.059	49.192	49.182
29	19	11	12.778	11.449	-1.330	0.033	0.029
30	19	27	-529.656	-529.715	0.059	39.076	39.069
31	20	19	-809.390	-810.839	1.449	23.421	23.655
32	21	20	-403.303	-404.021	0.718	4.693	4.736
33	25	16	634.285	502.883	-131.402	40.416	18.057
34	26	23	-37.750	-37.661	-0.089	0.210	0.228
35	28	29	-688.073	-688.080	0.007	2.600	2.579
36	28	30	688.073	688.080	0.007	7.509	7.447
37	30	12	861.890	860.466	-1.424	11.267	10.954
38	31	14	745.563	397.342	-348.221	40.910	12.138
Total			13332.628	8490.458	-427.907	2671.458	2421.993

Dari Tabel 4.11 dapat dilihat penurunan daya masing-masing bus dan penurunan aliran daya total setelah penempatan TCSC dengan *sizing* menggunakan optimasi PSO. Penurunan aliran daya dengan metode optimasi GSA lebih besar yaitu 430.367 MW dibandingkan dengan penurunan daya menggunakan metode optimasi PSO yaitu 427.907 MW. Metode optimasi GSA lebih bisa menurunkan aliran daya 3 MW lebih besar dibandingkan metode PSO. Hal tersebut menunjukkan bahwa dalam menyelesaikan masalah penentuan *sizing* dari TCSC pada saluran transmisi untuk meningkatkan *power transfer capability*, GSA memberikan hasil yang lebih baik daripada PSO.

Tabel 4.12. Kenaikan Pmaks pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan *Sizing* PSO

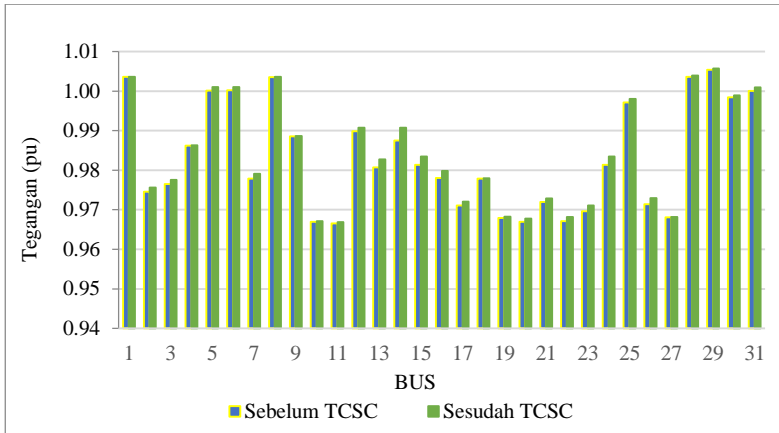
Line	Saluran		Pmaks (MW)		Kenaikan (MW)
	From	To	Before	After	
1	1	4	200.590	200.606	0.016
2	1	10	84.499	84.514	0.015
3	2	22	358.043	358.837	0.793
4	3	2	671.697	673.162	1.465
5	3	17	432.937	433.876	0.939
6	5	6	7110.250	7121.901	11.651
7	5	31	18488.727	18520.625	31.898
8	6	14	279.555	696.761	417.207
9	6	25	1423.189	1425.617	2.428
10	7	22	348.823	349.650	0.827
11	7	23	175.439	175.919	0.481
12	8	19	128.304	128.356	0.053
13	11	10	40.690	40.711	0.020
14	11	30	87.675	87.746	0.071
15	13	12	61.845	62.028	0.184
16	14	15	338.588	340.432	1.844
17	15	13	2886.670	2898.827	12.157
18	15	24	568.920	571.380	2.460
19	16	3	207.643	208.254	0.611
20	16	7	160.272	160.758	0.486
21	16	13	1094.336	1098.570	4.233
22	16	26	222.634	223.400	0.766
23	17	20	69.902	70.031	0.129
24	17	21	254.852	255.367	0.515
25	18	4	216.247	216.274	0.027

Tabel 4.12. Kenaikan P_{maks} pada Saluran Setelah Penempatan TCSC pada Saluran 6-14 dengan *Sizing* PSO (lanjutan 1)

Line	Saluran		Pmaks (MW)		Kenaikan (MW)
	From	To	Before	After	
26	18	9	718.475	718.572	0.098
27	18	19	33.067	33.080	0.013
28	18	27	164.907	164.940	0.033
29	19	11	107.765	107.837	0.071
30	19	27	41.538	41.556	0.018
31	20	19	72.280	72.360	0.080
32	21	20	96.573	96.744	0.171
33	25	16	66.378	66.560	0.182
34	26	23	496.750	498.313	1.563
35	28	29	2300.035	2301.688	1.653
36	28	30	791.002	791.661	0.658
37	30	12	162.199	162.423	0.224
38	31	14	137.619	138.191	0.572
Total			41100.917	41597.526	496.610

Dari Tabel 4.12 diatas dapat dilihat bahwa setelah penempatan TCSC pada saluran 8 terdapat kenaikan P_{maks} pada saluran 8 sendiri sebesar 417.207 MW dan secara total sistem terdapat kenaikan P_{maks} sebesar 496.610 MW. Hal tersebut menandakan bahwa setelah pemasangan TCSC dengan metode sensitivitas dan sizing dengan metode optimasi PSO didapatkan kenaikan P_{maks} secara total sistem sebesar 1.21%

Gambar 4.4 dibawah ini merupakan representasi tegangan setelah penempatan TCSC dengan sizing menggunakan metode optimasi PSO. Dapat dilihat tegangan berada pada range 0.96-1.01 per unit, hal tersebut menandakan tegangan masih dalam batas normal. Tegangan setelah penempatan TCSC dengan *sizing* menggunakan metode PSO mengalami kenaikan pada beberapa bus dibandingkan tegangan sebelum dilakukan penempatan TCSC.



Gambar 4.4 Grafik Tegangan Setelah Penempatan TCSC dengan *Sizing* Menggunakan Metode PSO

4.6 Aliran Daya dengan Kontingensi N-1 Sebelum dan Setelah Penempatan TCSC dengan Metode Optimasi GSA (*Gravitational Search Algorithm*)

Pada sub bab ini dilakukan simulasi penempatan TCSC dengan skenario adanya kontingensi n-1. Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui batasan dari kapasitas saluran saat terjadi kontingensi n-1 dan efek yang ditimbulkan sebelum dan sesudah pemasangan TCSC pada saluran 6-14 dengan *sizing* menggunakan metode optimasi GSA.

Saluran yang mengalami kontingensi yaitu line 16 atau saluran 14-15, sehingga aliran daya pada saluran dapat dilihat pada Tabel 4.13 dibawah ini.

Tabel 4.13. Aliran Daya dengan Adanya Kontingensi n-1 Sebelum Penempatan TCSC

Line	Saluran		Batas Kapasitas Saluran	Sebelum TCSC	Melampaui Batas
	From	To			
1	1	4	2078.461	1844.091	-
2	1	10	2078.461	1297.195	-
3	2	22	2078.461	506.612	-
4	3	2	1714.730	702.578	-

Tabel 4.13. Aliran Daya dengan Adanya Kontingensi n-1 Sebelum Penempatan TCSC (lanjutan 1)

Line	Saluran		Batas Kapasitas Saluran	Sebelum TCSC	Melampaui Batas
	From	To			
5	3	17	2078.461	366.347	-
6	5	6	1714.730	400.563	-
7	5	31	1714.730	2017.497	-302.767
8	6	14	2805.922	626.405	-
9	6	25	2805.922	373.053	-
10	7	22	1714.730	751.034	-
11	7	23	1714.730	1639.869	-
12	8	19	2078.461	819.820	-
13	11	10	2078.461	174.277	-
14	11	30	2078.461	683.581	-
15	13	12	2078.461	1455.686	-
17	15	13	2805.922	530.203	-
18	15	24	2078.461	0.000	-
19	16	3	2078.461	236.796	-
20	16	7	1714.730	41.293	-
21	16	13	2805.922	696.155	-
22	16	26	1714.730	1028.257	-
23	17	20	1714.730	402.442	-
24	17	21	1714.730	403.340	-
25	18	4	2078.461	1753.505	-
26	18	9	1714.730	1038.770	-
27	18	19	2078.461	608.209	-
28	18	27	1714.730	900.065	-
29	19	11	1714.730	11.461	-
30	19	27	1714.730	529.715	-

Tabel 4.13. Aliran Daya dengan Adanya Kontingensi n-1 Sebelum Penempatan TCSC (lanjutan 2)

Line	Saluran		Batas Kapasitas Saluran	Sebelum TCSC	Melampaui Batas
	From	To			
31	20	19	1714.730	810.825	-
32	21	20	1714.730	404.014	-
33	25	16	2078.461	504.074	-
34	26	23	1714.730	37.661	-
35	28	29	2805.922	688.080	-
36	28	30	2805.922	688.080	-
37	30	12	2078.461	860.480	-
38	31	14	1714.730	400.554	-

Dari Tabel 4.13 diatas dapat dilihat bahwa dengan adanya kontingensi n-1 yaitu putusnya satu saluran pada sistem dalam kasus ini yaitu line 16 atau saluran yang menghubungkan bus 14-15 terjadi perubahan aliran daya. Daya yang semula disalurkan melalaui saluran 14-15 akan disalurkan melalui saluran lain dan menyebabkan adanya satu saluran yang aliran dayanya melebihi kapasitas saluran yaitu saluran 5-31. Kapasitas saluran 5-31 adalah 1714 MW namun daya yang mengalir pada saluran tersebut sebesar 2017 MW. Oleh karena itu diperlukan TCSC untuk menurunkan aliran daya dan juga menaikkan P_{maks} pada saluran.

Tabel 4.14 dibawah ini merupakan detail aliran daya dengan adanya kontingensi n-1 yaitu pada saluran 14-15 namun setelah pemasangan dari TCSC.

Tabel 4.14. Aliran Daya dengan Adanya Kontingensi n-1 Setelah Penempatan TCSC

Line	Saluran		Batas Kapasitas Saluran	Sebelum TCSC	Sesudah TCSC	Melampaui Batas
	From	To				
1	1	4	2078.461	1844.091	1842.539	-
2	1	10	2078.461	1297.195	1298.740	-
3	2	22	2078.461	506.612	504.044	-
4	3	2	1714.730	702.578	700.076	-
5	3	17	2078.461	366.347	349.615	-
6	5	6	1714.730	400.563	88.143	-
7	5	31	1714.730	2017.497	312.404	-
8	6	14	2805.922	626.405	635.859	-
9	6	25	2805.922	373.053	2132.255	-
10	7	22	1714.730	751.034	375.643	-
11	7	23	1714.730	1639.869	752.202	-
12	8	19	2078.461	819.820	1639.841	-
13	11	10	2078.461	174.277	821.131	-
14	11	30	2078.461	683.581	191.083	-
15	13	12	2078.461	1455.686	699.313	-
17	15	13	2805.922	530.203	919.000	-
18	15	24	2078.461	0.000	0.000	-
19	16	3	2078.461	236.796	222.515	-
20	16	7	1714.730	41.293	45.227	-
21	16	13	2805.922	696.155	737.605	-
22	16	26	1714.730	1028.257	1027.435	-
23	17	20	1714.730	402.442	394.047	-
24	17	21	1714.730	403.340	394.941	-
25	18	4	2078.461	1753.505	1751.959	-

Tabel 4.14. Aliran Daya dengan Adanya Kontingensi n-1 Setelah Penempatan TCSC (lanjutan 1)

Line	Saluran		Batas Kapasitas Saluran	Sebelum TCSC	Sesudah TCSC	Melampaui Batas
	From	To				
26	18	9	1714.730	1038.770	1038.738	-
27	18	19	2078.461	608.209	607.348	-
28	18	27	1714.730	900.065	899.349	-
29	19	11	1714.730	11.461	26.963	-
30	19	27	1714.730	529.715	528.992	-
31	20	19	1714.730	810.825	793.851	-
32	21	20	1714.730	404.014	395.601	-
33	25	16	2078.461	504.074	2007.127	-
34	26	23	1714.730	37.661	38.661	-
35	28	29	2805.922	688.080	687.996	-
36	28	30	2805.922	688.080	687.996	-
37	30	12	2078.461	860.480	877.129	-
38	31	14	1714.730	400.554	312.398	-

Dari Tabel 4.14 dapat dilihat pada kasus adanya kontingen n-1 yaitu putusnya salah satu saluran pada sistem yang semula sebelum penempatan TCSC ada satu saluran yang aliran dayanya melebihi kapasitas saluran, setelah penempatan TCSC menjadi aman karena tidak ada aliran daya yang melebihi kapasitas saluran. Dari kasus tersebut semakin membuktikan bahwa TCSC yang merupakan salah satu peralatan FACTS Device dapat menurunkan aliran daya dan menaikkan *power transfer capability* pada saluran.

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan percobaan yang dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Penempatan optimal TCSC pada saluran transmisi Jamali 500 kV Tahun 2017 untuk meningkatkan *power transfer capability* yaitu pada saluran 8 atau saluran 6-14 dengan *sizing* optimal sebesar -0.597.
2. Penempatan optimal TCSC seperti pada *point 1* didapatkan berdasarkan *Sensitivity Methods* Aj, Dij, Uij dimana metode Aj dan Dij dalam kasus ini memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan metode Uij.
3. Dalam menentukan *sizing* pada TCSC, metode optimasi memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan metode *trial* dan *error*. Dengan menggunakan metode optimasi GSA (*Gravitational Search Algorithm*), *power transfer capability* saluran Jamali 500 kV Tahun 2017 dapat naik sebesar 430.367 MW atau 3.23% dibandingkan tanpa metode optimasi yaitu sebesar 364.459 MW atau 2.73%.
4. Metode GSA memberikan hasil optimasi yang lebih baik dibandingkan metode PSO (*Particle Swarm Optimization*) dalam menentukan *sizing* TCSC pada saluran transmisi. Hal tersebut dibuktikan dari hasil simulasi bahwa GSA dapat meningkatkan *power transfer capability* sebesar 430.367 atau 3.23% sementara PSO lebih kecil yaitu 427.907 atau 3.21%

5.2. Saran

Adapun saran untuk penelitian dan pengembangan selanjutnya yang berkaitan dengan tugas akhir ini yaitu :

1. Optimasi penentuan penempatan dan *sizing* TCSC untuk meningkatkan *power transfer capability* dapat ditambah dengan mempertimbangkan kontingensi dan kemampuan *thermal* pada saluran.
2. Optimasi untuk meningkatkan *power transfer capability* dapat dilakukan dengan menggunakan *Optimal Power Flow* sehingga biaya sebelum dan sesudah pun dapat dibandingkan.

3. Menggunakan koordinasi *FACTS devices* lainnya sehingga dapat dibandingkan mana yang lebih efektif antara penggunaan satu jenis *FACTS devices* atau kombinasi dari beberapa jenis *FACTS devices*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pooja P. Kulkarni dan Dr. N. D. Ghawghawe, “*Optimal Placement and Parameter setting of TCSC in Power Transmission System to increase the Power Transfer Capability*”, International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA), 978-1-4673-6817-9/15, 2015.
- [2] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, ”Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2016 s.d 2025”, Jakarta
- [3] Ghahremani E., Kamwa I., “*Optimal Placement of Multiple-Type FACTS Devices to Maximize Power System Loadability Using a Generic Graphical User Interface*”, Power Systems, IEEE Transactions, Vol. 28, Issue: 2 pp. 764-778, 2013.
- [4] Wartana LM., Singh J.G., Ongsakul W., Agustini N.P., “*Optimal Placement of a Series FACTS Controller in Java-Bali 24 bus Indonesian System for Maximizing System Loadability by Evolutionary Optimization Technique* ”, Third International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS) pp. 516-521, 2012.
- [5] Reddy S.S., Kumari M.S. and Sydudu, M., “*Congestion management in deregulated power system by optimal choice and allocation of FACTS controllers using multi-objective Genetic Algorithm*”, Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES pp. 1-7, 2010.
- [6] Frisky Alfarizy, Adi Soeprijanto, Heri Suryoatmojo, “*Penempatan Optimal Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) dan Static Var Compensator (SVC) Menggunakan Quantum Behaved Particle Swarm Optimization (QPSO) untuk Pembebanan Maksimal*”, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro ITS, Surabaya, 2012.
- [7] Rashed G.I., Yuanzhang Sun, Shaheen H.I., “*Optimal TCSC placement in a power system by means of Differential Evolution*

Algorithm considering loss minimization", 6th IEEE International Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) pp. 2209-2215, 2011.

- [8] Biplab Bhattacharyya, Sanjay Kumar, "*Loadability enhancement with FACTS devices using Gravitational Search Algorithm*", Electrical Power and Energy Systems 78 pp 470-479, ELSEVIER, 2016.
- [9] Esmat Rashedi, Hossein Nezamabadi-pour, Saeid Saryazdi, *GSA: A Gravitational Search Algorithm*", Information Sciences 179 pp. 2232-2248, ELSEVIER, 2009.
- [10] Hadi Saadat, "*Power System Analysis*," Mc.Graw-Hill International Edition, 1999.
- [11] Ontoseno Penangsang, "Analisis Aliran Daya pada Sistem Tenaga Listrik", Teknik Elektro ITS, 2012.
- [12] P. Kundur, "*Power System Stability and Control*," McGraw-Hill International Edition, 1993.
- [13] John J. Grainger, William D. Stevenson, JR," *Power System Analysis*", Mc.Graw-Hill, Singapore, 1994.
- [14] Kwang-Ho Lee and Jun-Mo Moon, "*Optimal Siting of UPFC for Reducting Congestion Cost by Using Shadow Prices*", IEEE transaction on PE,11A-4, 2001.
- [15] Joseph Mutane and Goran Strbac, "*Transmission Network Reinforcement Versus FACTS: An Economic Assesment*", IEEE Tanssaction On Power System Vol 15, No 3, August 2000.
- [16] CR Fuerte-Esquivael, Enrique Acha, "*A Newton Type Algorithm The Control of Power Flow in Electrical Power Network*", Tanssaction On Power System, Vol 12, No. 4, November 1997.
- [17] CR Fuerte, Esquieval, E. Acha, SG Tan JJ Riuco, "*Efficient Object Oriented Power System Software for The Analysis of Large Scale*

Network 86 Containing FACTS-Controlled Brances", IEEE Tanssaction On Power System Vol 13, No2, May 1998.

- [18] Douglas J. Gotham and G.T. Heydt, "*Power Flow Control and Power Flow Studies for Systems With FACTS Devices*", IEEE Tanssaction on Power System, Vol 13, No. 1, Februari 1998.
- [19] Lijun Cai and Istvan Erlich, "*Optimal Choice and Allocation of FACTS Device in Deregulated Electricity Market using Genetic Aloritm*", IEEE Transaction On Power System, 2004.
- [20] E.J. Oliveira, J. W. Marangon Lima, K.C. Almeida, "*Allocation of FACTS Devices in Hydrothermal Systems*", IEEE Transaction on Power Systems Vol. 15, No. 1 February 2000.
- [21] John J. Paserba, Gregory FR, M. Takeda, T. Arutsuka, "*FACTS and Custom Power Equipment for The Enhancement of Power Transmission System Performance and Power Quality*", Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (VII SEPOPE), Brazil, 2000.
- [22] Umar, "*Optimal Location of TCSC and SVC in 500 kV Jawa-Bali Power System by Means of Breeder Genetic Algorithm*", M.T. thesis, Dept. Electrical Engineering, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, 2008.
- [23] G. Glanzmann, G. Andersson, "*Coordinated Control of FACTS Devices based on Optimal Power Flow*", 2004.
- [24] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pe´rez, Ce´sar Angeles-Camacho, "*FACTS Modelling and Simulation in Power Networks*", John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [25] Stephane Gerbex, Rachid Cerkaoui, and Alain J. Germond, "*Optimal Location of Multi-Type FACTS Devices in a Power system by Means of Genetic Algorithm*", IEEE Transaction On Power System, Vol 16, No. 3, August 2001.

- [26] Janita D. Indiarti, "*Penempatan TCSC Pada Jaring Transmisi untuk Optimal Economic Dispatch menggunakan Particle Swarm Optimization*" S1-Tugas Akhir, Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2010.
- [27] K.S. Tang, K.F. Man, S.Kwong, Q. He, "*Genetic Algorithms and Their Applications*", IEEE Signal Processing Magazine 13 (6) pp. 22-37, IEEE, 2006.
- [28] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatto, M.P. Vecchi, "*Optimization by Simulated Annealing*", Science 220 pp. 671-680, ELSEVIER, 1983.
- [29] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colorni, "*The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents*", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B 26 (1) pp. 29-41, IEEE, 1996.
- [30] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "*Particle Swarm Optimization*", In Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, IEEE Service Center, Piscataway, 1995.
- [31] V. Gazi, K.M. Passino, "*Stability Analysis of Social Foraging Swarms*", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B 34 (1) pp. 539-557, IEEE, 2004.
- [32] D.H. Wolpert, W.G. Macready, "*No Free Lunch Theorems for Optimization*", IEEE Transactions on Evolutionary Computation 1 pp. 67-82, IEEE, 1997.
- [33] Mr. G. Loganathan, Mr. D. Rajkumar, Mr. M. Vigneshwaran, Mr. R. Senthilkumar, "*An Enhanced Time Effective Particle Swarm Intelligence for the Practical Economic Load Dispatch*", IEEE, 2014.

- [34] ST. Clair, “*Practical Concepts in Capability and Performance of Transmission Lines*”, December 1953.
- [35] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, G. Andersson, “*Improving Power System Dynamics by Series Connected FACTS Devices*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No.4, October 1997.
- [36] Murat Fahrioglu, Fernando L.Alvarado, ”*Using TCSC Devices for Optimal Economic Dispatch*”, Department of Electrical and Computing Engineering of Wisconsin University.
- [37] Maolong Xi, Jun Sun, Wenbo Xu, “*An improved quantum-behaved particle swarm optimization algorithm with weighted mean best position*”, Elsevier Applied Mathematics and Computation, 205, pp 751-759, 2008.
- [38] Adi Soeprijanto, Ontoseno Penangsang, “Modul Buku Ajar Analisis Sistem Tenaga”, Teknik Elektro ITS.

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]

Lampiran 1

Data Pembangkitan dan Pembebanan Setiap Bus Jamali 500 kV 2017

No Bus	Nama Bus	Bus Code	Load		Generation	
			MW	MVAR	MW	MVAR
1	Paiton	0	839	162	0	0
2	Cirata	0	550	201	0	0
3	Saguling	0	0	0	0	0
4	Grati	0	512	217	0	0
5	New Suralaya	0	69	24	0	0
6	Suralaya	0	80	79	0	0
7	Muara Tawar	0	0	0	0	0
8	Tanjung Jati	0	263	42	0	0
9	Gresik	0	117	-89	0	0
10	Kediri	0	444	134	0	0
11	Pedan	0	657	194	0	0
12	Tasikmalaya	0	166	67	0	0
13	Depok	0	517	-82	0	0
14	New Balaraja	0	946	134	0	0
15	Gandul	0	919	-106	0	0
16	Cibinong	0	364	173	0	0
17	Bandung Selatan	0	439	174	0	0
18	Surabaya Barat	0	1284	518	0	0
19	Unggaran	0	1915	143	0	0
20	Mandirancang	0	0	68	0	0
21	Ujung Berung	0	0	-78	0	0
22	Cibatu	0	878	566	0	0
23	Cawang	0	710	150	0	0
24	Kembangan	0	0	0	0	0
25	Cilegon	0	122	281	0	0

Data Pembangkitan dan Pembebanan Setiap Bus Jamali 500 kV 2017
(lanjutan1)

No Bus	Nama Bus	Bus Code	Load		Generation	
			MW	MVAR	MW	MVAR
26	Bekasi	0	1061	-73	0	0
27	Ngimbang	0	358	83	0	0
28	Adipala	0	0	0	0	0
29	Cilacap	0	0	0	0	0
30	Kesugihan	0	0	0	0	0
31	Banten	0	0	0	0	0
32	Bus Slaya1	2	0	0	357	0
33	Bus Slaya2	2	0	0	362	0
34	Bus Slaya3	2	0	0	377	0
35	Bus Slaya4	2	0	0	157	0
36	Bus Slaya5	1	0	0	0	0
37	Bus Slaya6	2	0	0	571	0
38	Bus Slaya7	2	0	0	571	0
39	Bus New Slaya	2	0	0	470	0
40	Bus Mtawar1.0	2	0	0	196.31	0
41	Bus Mtawar1.1	2	0	0	136.14	0
42	Bus Mtawar1.2	2	0	0	136.23	0
43	Bus Mtawar1.3	2	0	0	136.75	0
44	Bus Mtawar3.1	2	0	0	131.80	0
45	Bus Mtawar3.2	2	0	0	132.93	0
46	Bus Mtawar5.0	2	0	0	70.89	0
47	Bus Mtawar5.1	2	0	0	142.58	0
48	Bus Cirata2	2	0	0	71	0
49	Bus Cirata3	2	0	0	71	0
50	Bus Cirata5	2	0	0	72	0

Data Pembangkitan dan Pembebanan Setiap Bus Jamali 500 kV 2017
(lanjutan2)

No Bus	Nama Bus	Bus Code	Load		Generation	
			MW	MVAR	MW	MVAR
51	Bus Cirata6	2	0	0	70	0
52	Bus Cirata7	2	0	0	71	0
53	Bus Saguling1	2	0	0	145.73	0
54	Bus Saguling2	2	0	0	144.28	0
55	Bus Saguling3	2	0	0	143.52	0
56	Bus Saguling4	2	0	0	140.13	0
57	Bus Tjati1	2	0	0	383	0
58	Bus Tjati2	2	0	0	575	0
59	Bus Tjati3	2	0	0	395	0
60	Bus Tjati4	2	0	0	553	0
61	Bus Gresik1	2	0	0	42.23	0
62	Bus Gresik2	2	0	0	42.23	0
63	Bus Gresik3	2	0	0	95.95	0
64	Bus Gresik4	2	0	0	95.95	0
65	Bus Gresik SB1	2	0	0	149.10	0
66	Bus Gresik SB3	2	0	0	148.66	0
67	Bus Gresik GB1.1	2	0	0	97.90	0
68	Bus Gresik GB1.2	2	0	0	96.05	0
69	Bus Gresik GB1.3	2	0	0	98.07	0
70	Bus Gresik GB3.1	2	0	0	92.81	0
71	Bus Gresik GB3.2	2	0	0	92.81	0
72	Bus Gresik GB3.3	2	0	0	106.99	0
73	Bus Grati1.1	2	0	0	98.38	0
74	Bus Grati1.2	2	0	0	95.95	0
75	Bus Grati1.3	2	0	0	97.04	0

Data Pembangkitan dan Pembebanan Setiap Bus Jamali 500 kV 2017
(lanjutan3)

No Bus	Nama Bus	Bus Code	Load		Generation	
			MW	MVAR	MW	MVAR
76	Bus Grati1.0	2	0	0	158.40	0
77	Bus Paiton1	2	0	0	306.42	0
78	Bus Paiton2	2	0	0	303.34	0
79	Bus Paiton3	2	0	0	581	0
80	Bus Paiton5	2	0	0	558.40	0
81	Bus Paiton6	2	0	0	560.68	0
82	Bus Paiton7	2	0	0	606	0
83	Bus Paiton8	2	0	0	529.22	0
84	Bus Paiton9	2	0	0	538.56	0
85	Bus Cilacap1	2	0	0	169	0
86	Bus Cilacap2	2	0	0	170	0
87	Bus Cilacap3	2	0	0	350	0
TOTAL			13209.6918	2982.2245	13064.4300	0.0000

Lampiran 2

Data Saluran Jamali 500 kV Tahun 2017

No Line	from bus	to bus	R'	X'	1/2 B	Length
			p.u.	p.u.	p.u.	km
1	1	4	0.0004410	0.0049343	0.1555175	87.86
2	1	10	0.0010265	0.0114847	0.3619650	204.50
3	2	22	0.0002739	0.0026324	0.0000000	46.76
4	3	2	0.0001474	0.0014168	0.0000000	25.17
5	3	17	0.0001957	0.0021902	0.0000000	39.00
6	5	6	0.0000146	0.0001407	0.0000000	1.25
7	5	31	0.0000055	0.0000541	0.0000000	0.98
8	6	14	0.0003677	0.0035333	0.0000000	62.76
9	6	25	0.0000626	0.0007008	0.0000000	12.48
10	7	22	0.0002822	0.0027112	0.0000000	48.16
11	7	23	0.0005625	0.0054048	0.0000000	48.00
12	8	19	0.0006766	0.0075703	0.2183220	134.80
13	11	10	0.0020531	0.0229694	0.1649090	204.50
14	11	30	0.0009839	0.0110073	0.3174415	196.00
15	13	12	0.0014030	0.0156967	0.4507775	279.50
16	14	15	0.0002979	0.0028622	0.0000000	50.84
17	15	13	0.0000347	0.0003334	0.0000000	5.92
18	15	24	0.0001513	0.0016928	0.0000000	30.14
19	16	3	0.0004111	0.0045995	0.1326450	81.90
20	16	7	0.0006211	0.0059678	0.0000000	53.00
21	16	13	0.0000912	0.0008765	0.0000000	15.57
22	16	26	0.0004441	0.0042675	0.0000000	37.90
23	17	20	0.0013981	0.0134331	0.0962035	119.30
24	17	21	0.0003854	0.0037034	0.0000000	32.89
25	18	4	0.0003986	0.0044596	0.0000000	79.41

Data Saluran Jamali 500 kV Tahun 2017 (lanjutan 1)

No Line	from bus	to bus	R'	X'	1/2 B	Length
			p.u.	p.u.	p.u.	km
26	18	9	0.0001400	0.0013455	0.0000000	23.90
27	18	19	0.0029792	0.0286229	0.2049870	254.20
28	18	27	0.0005974	0.0057404	0.0000000	50.98
29	19	11	0.0009036	0.0086814	0.0000000	77.10
30	19	27	0.0023479	0.0225580	0.1622335	200.34
31	20	19	0.0013478	0.0129490	0.3709440	229.50
32	21	20	0.0010129	0.0097320	0.0696970	86.43
33	25	16	0.0013133	0.0146925	0.1054850	130.81
34	26	23	0.0001973	0.0018961	0.0000000	16.84
35	28	29	0.0000381	0.0004387	0.0000000	4.79
36	28	30	0.0001100	0.0012668	0.0000000	13.83
37	30	12	0.0005446	0.0060933	0.1749890	108.50
38	31	14	0.0007216	0.0071762	0.0000000	65.40

Lampiran 3

Data Transformator Jamali 500 kV Tahun 2017

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	1/2 B
			p.u.	p.u.	p.u.
39	32	6	0.00051055	0.02552681	0.00000000
40	33	6	0.00051055	0.02552681	0.00000000
41	34	6	0.00051055	0.02552681	0.00000000
42	35	6	0.00051055	0.02552681	0.00000000
43	36	6	0.00031994	0.01599680	0.00000000
44	37	6	0.00031994	0.01599680	0.00000000
45	38	6	0.00031994	0.01599680	0.00000000
46	39	5	0.00032000	0.01599680	0.00000000
47	40	7	0.00033335	0.05666569	0.00000000
48	41	7	0.00052634	0.08947213	0.00000000
49	42	7	0.00052634	0.08947213	0.00000000
50	43	7	0.00052634	0.08947213	0.00000000
51	44	7	0.00052632	0.08947213	0.00000000
52	45	7	0.00052632	0.08947213	0.00000000
53	46	7	0.00033333	0.05666569	0.00000000
54	47	7	0.00033333	0.05666569	0.00000000
55	48	2	0.00035728	0.06430769	0.00000000
56	49	2	0.00035728	0.06430769	0.00000000
57	50	2	0.00035728	0.06430769	0.00000000
58	51	2	0.00035728	0.06430769	0.00000000
59	52	2	0.00035728	0.06430769	0.00000000
60	53	3	0.00035728	0.06430769	0.00000000
61	54	3	0.00035728	0.06430769	0.00000000
62	55	3	0.00035728	0.06430769	0.00000000
63	56	3	0.00035728	0.06430769	0.00000000

Data Transformator Jamali 500 kV Tahun 2017

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	1/2 B
			p.u.	p.u.	p.u.
64	57	8	0.00032000	0.01599680	0.00000000
65	58	8	0.00032000	0.01599680	0.00000000
66	59	8	0.00032000	0.01599680	0.00000000
67	60	8	0.00032000	0.01599680	0.00000000
68	61	9	0.00059838	0.07790620	0.00000000
69	62	9	0.00059838	0.07790620	0.00000000
70	63	9	0.00036000	0.05399880	0.00000000
71	64	9	0.00036000	0.05399880	0.00000000
72	65	9	0.00036000	0.05399880	0.00000000
73	66	9	0.00036000	0.05399880	0.00000000
74	67	9	0.00059838	0.07790620	0.00000000
75	68	9	0.00059838	0.07790620	0.00000000
76	69	9	0.00059838	0.07790620	0.00000000
77	70	9	0.00059838	0.07790620	0.00000000
78	71	9	0.00059838	0.07790620	0.00000000
79	72	9	0.00059838	0.07790620	0.00000000
80	73	4	0.00059838	0.07790620	0.00000000
81	74	4	0.00059838	0.07790620	0.00000000
82	75	4	0.00059838	0.07790620	0.00000000
83	76	4	0.00036802	0.05519877	0.00000000
84	77	1	0.00021278	0.02553103	0.00000000
85	78	1	0.00021278	0.02553103	0.00000000
86	79	1	0.00013890	0.01666609	0.00000000
87	80	1	0.00015385	0.01846090	0.00000000
88	81	1	0.00015385	0.01846090	0.00000000

Data Transformator Jamali 500 kV Tahun 2017

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	1/2 B
			p.u.	p.u.	p.u.
89	82	1	0.00015385	0.01846090	0.00000000
90	83	1	0.00015385	0.01846090	0.00000000
91	84	1	0.00015385	0.01846090	0.00000000
92	85	29	0.00032000	0.01599680	0.00000000
93	86	29	0.00032000	0.01599680	0.00000000
94	87	29	0.00032000	0.01599680	0.00000000

Lampiran 5

Validasi Aliran Daya Sebelum Penempatan TCSC antara MATLAB dan ETAP

Aliran Daya BEFORE TCSC				
FROM	TO	ETAP	MATLAB I	ERROR (%)
1	4	1843.744	1843.965	0.012
1	10	1297.354	1297.320	-0.003
2	22	506.090	506.400	0.061
3	2	702.075	702.370	0.042
3	17	-364.086	-364.933	0.233
5	6	-345.435	-345.035	-0.116
5	31	745.950	745.594	-0.048
6	14	1540.516	1539.757	-0.049
6	25	757.064	756.733	-0.044
7	22	373.587	373.267	-0.086
7	23	750.963	751.135	0.023
8	19	1639.691	1639.867	0.011
11	10	-819.790	-819.926	0.016
11	30	175.541	175.700	0.090
13	12	-684.645	-684.922	0.041
14	15	1327.307	1326.279	-0.077
15	13	402.863	401.875	-0.245
15	24	0.000	0.000	0.000
16	3	-235.021	-235.595	0.245
16	7	41.809	41.617	-0.461
16	13	-570.072	-569.369	-0.123
16	26	1028.405	1028.181	-0.022
17	20	-401.306	-401.732	0.106
17	21	-402.209	-402.630	0.105
18	4	-1752.999	-1753.379	0.022

Validasi Aliran Daya Sebelum Penempatan TCSC antara MATLAB dan ETAP (lanjutan 1)

Aliran Daya BEFORE TCSC				
FROM	TO	ETAP	MATLAB I	ERROR (%)
18	9	-1038.717	-1038.767	0.005
18	19	607.930	608.139	0.034
18	27	899.786	900.007	0.025
19	11	12.755	12.778	0.186
19	27	-529.376	-529.656	0.053
20	19	-808.558	-809.390	0.103
21	20	-402.884	-403.303	0.104
25	16	634.613	634.285	-0.052
26	23	-37.559	-37.750	0.509
28	29	-688.028	-688.073	0.007
28	30	688.028	688.073	0.007
30	12	861.662	861.890	0.026
31	14	745.919	745.563	-0.048
32	6	357.000	357.000	0.000
33	6	362.000	362.000	0.000
34	6	377.000	377.000	0.000
35	6	157.000	157.000	0.000
36	6	333.198	331.425	-0.532
37	6	571.000	571.000	0.000
38	6	571.000	571.000	0.000
39	5	470.000	470.000	0.000
40	7	196.310	196.310	0.000
41	7	136.140	136.140	0.000
42	7	136.230	136.230	0.000
43	7	136.750	136.750	0.000

Validasi Aliran Daya Sebelum Penempatan TCSC antara MATLAB dan ETAP (lanjutan 2)

Aliran Daya BEFORE TCSC				
FROM	TO	ETAP	MATLAB I	ERROR (%)
44	7	131.800	131.800	0.000
45	7	132.930	132.930	0.000
46	7	70.890	70.890	0.000
47	7	142.580	142.580	0.000
48	2	71.000	71.000	0.000
49	2	71.000	71.000	0.000
50	2	72.000	72.000	0.000
51	2	70.000	70.000	0.000
52	2	71.000	71.000	0.000
53	3	145.730	145.730	0.000
54	3	144.280	144.280	0.000
55	3	143.520	143.520	0.000
56	3	140.130	140.130	0.000
57	8	383.000	383.000	0.000
58	8	575.000	575.000	0.000
59	8	395.000	395.000	0.000
60	8	553.000	553.000	0.000
61	9	42.230	42.230	0.000
62	9	42.230	42.230	0.000
63	9	95.950	95.950	0.000
64	9	95.950	95.950	0.000
65	9	149.100	149.100	0.000
66	9	148.660	148.660	0.000
67	9	97.900	97.900	0.000
68	9	96.050	96.050	0.000

Validasi Aliran Daya Sebelum Penempatan TCSC antara MATLAB dan ETAP (lanjutan 3)

Aliran Daya BEFORE TCSC				
FROM	TO	ETAP	MATLAB I	ERROR (%)
69	9	98.070	98.070	0.000
70	9	92.810	92.810	0.000
71	9	92.810	92.810	0.000
72	9	106.990	106.990	0.000
73	4	98.380	98.380	0.000
74	4	95.950	95.950	0.000
75	4	97.040	97.040	0.000
76	4	158.400	158.400	0.000
77	1	306.420	306.420	0.000
78	1	303.340	303.340	0.000
79	1	581.000	581.000	0.000
80	1	558.400	558.400	0.000
81	1	560.680	560.680	0.000
82	1	606.000	606.000	0.000
83	1	529.220	529.220	0.000
84	1	538.560	538.560	0.000
85	29	169.000	169.000	0.000
86	29	170.000	170.000	0.000
87	29	350.000	350.000	0.000
TOTAL		21900.598	21892.188	-0.038

Lampiran 6

Validasi Aliran Daya Setelah Penempatan TCSC antara MATLAB dan ETAP

Aliran Daya AFTER TCSC				
FROM	TO	ETAP	MATLAB I	ERROR (%)
1	4	1843.866	1844.091	0.012
1	10	1297.233	1297.195	-0.003
2	22	506.300	506.613	0.062
3	2	702.279	702.578	0.043
3	17	-365.498	-366.347	0.232
5	6	-0.092	0.000	-100.000
5	31	400.613	400.565	-0.012
6	14	2018.647	2017.477	-0.058
6	25	626.659	626.424	-0.037
7	22	373.376	373.053	-0.087
7	23	750.858	751.034	0.023
8	19	1639.694	1639.869	0.011
11	10	-819.690	-819.820	0.016
11	30	174.125	174.278	0.088
13	12	-683.313	-683.581	0.039
14	15	1456.778	1455.667	-0.076
15	13	531.248	530.184	-0.200
15	24	0.000	0.000	0.000
16	3	-236.223	-236.795	0.242
16	7	41.486	41.293	-0.464
16	13	-696.921	-696.136	-0.113
16	26	1028.483	1028.256	-0.022
17	20	-402.015	-402.441	0.106
17	21	-402.918	-403.340	0.105
18	4	-1753.121	-1753.505	0.022

Validasi Aliran Daya Setelah Penempatan TCSC antara MATLAB dan ETAP (lanjutan 1)

Aliran Daya AFTER TCSC				
FROM	TO	ETAP	MATLAB I	ERROR (%)
18	9	-1038.720	-1038.770	0.005
18	19	608.000	608.209	0.034
18	27	899.842	900.065	0.025
19	11	11.438	11.461	0.201
19	27	-529.432	-529.715	0.053
20	19	-809.992	-810.825	0.103
21	20	-403.594	-404.014	0.104
25	16	504.325	504.093	-0.046
26	23	-37.466	-37.661	0.519
28	29	-688.036	-688.080	0.006
28	30	688.036	688.080	0.006
30	12	860.258	860.480	0.026
31	14	400.604	400.555	-0.012
32	6	357.000	357.000	0.000
33	6	362.000	362.000	0.000
34	6	377.000	377.000	0.000
35	6	157.000	157.000	0.000
36	6	335.537	333.762	-0.529
37	6	571.000	571.000	0.000
38	6	571.000	571.000	0.000
39	5	470.000	470.000	0.000
40	7	196.310	196.310	0.000
41	7	136.140	136.140	0.000
42	7	136.230	136.230	0.000
43	7	136.750	136.750	0.000

Validasi Aliran Daya Setelah Penempatan TCSC antara MATLAB dan ETAP (lanjutan 2)

Aliran Daya AFTER TCSC				
FROM	TO	ETAP	MATLAB I	ERROR (%)
44	7	131.800	131.800	0.000
45	7	132.930	132.930	0.000
46	7	70.890	70.890	0.000
47	7	142.580	142.580	0.000
48	2	71.000	71.000	0.000
49	2	71.000	71.000	0.000
50	2	72.000	72.000	0.000
51	2	70.000	70.000	0.000
52	2	71.000	71.000	0.000
53	3	145.730	145.730	0.000
54	3	144.280	144.280	0.000
55	3	143.520	143.520	0.000
56	3	140.130	140.130	0.000
57	8	383.000	383.000	0.000
58	8	575.000	575.000	0.000
59	8	395.000	395.000	0.000
60	8	553.000	553.000	0.000
61	9	42.230	42.230	0.000
62	9	42.230	42.230	0.000
63	9	95.950	95.950	0.000
64	9	95.950	95.950	0.000
65	9	149.100	149.100	0.000
66	9	148.660	148.660	0.000
67	9	97.900	97.900	0.000
68	9	96.050	96.050	0.000

Validasi Aliran Daya Setelah Penempatan TCSC antara MATLAB dan ETAP (lanjutan 3)

Aliran Daya AFTER TCSC				
FROM	TO	ETAP	MATLAB I	ERROR (%)
69	9	98.070	98.070	0.000
70	9	92.810	92.810	0.000
71	9	92.810	92.810	0.000
72	9	106.990	106.990	0.000
73	4	98.380	98.380	0.000
74	4	95.950	95.950	0.000
75	4	97.040	97.040	0.000
76	4	158.400	158.400	0.000
77	1	306.420	306.420	0.000
78	1	303.340	303.340	0.000
79	1	581.000	581.000	0.000
80	1	558.400	558.400	0.000
81	1	560.680	560.680	0.000
82	1	606.000	606.000	0.000
83	1	529.220	529.220	0.000
84	1	538.560	538.560	0.000
85	29	169.000	169.000	0.000
86	29	170.000	170.000	0.000
87	29	350.000	350.000	0.000
TOTAL		21897.083	21888.683	-0.038

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BIOGRAFI PENULIS



Fitri Nur Eka Fauzi Mur Prasetyo, usually call Ozi, (born March 26, 1993 in Sukoharjo, Central Java) senior college student of Electrical Engineering major in Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Started her education at SD Bulakrejo 04. Then proceeded to Junior High School at SMP Negeri 1 Sukoharjo. Continues Senior High School at SMA N 3 Surakarta, Then received at Politechnic ATMI Surakarta, Mechatronic

Engineering major. There are many organization that followed by Mrs. Ozi at Politechnic ATMI Surakarta include Badan Perwakilan Mahasiswa, Mahasiswa Pecinta Alam, UKM Journalistic, and several time become core committee of the existing event. After graduated from Diploma program, Mrs.Ozi continue her study to Bachelor Degree at Electrical Engineering major, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Engineering. Mrs. Ozi interested in the field of Power Systems Simulation and Renewable Energy. One of the achievement is won 3rd on Go Green in The City by Schneider Electric in 2016. If want to contact Mrs. Ozi can by email : **fitri.oz93@gmail.com**

[*Halaman ini sengaja dikosongkan*]